

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Alen Hlevnjak

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Alen Hlevnjak

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru rada doc.dr.sc. Ivici Garašiću, kao i dr. sc. Maji Jurici na korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada. Također, velike zahvale idu i tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje koji su mi pomogli oko eksperimenta.

Posebno se zahvaljujem obitelji i djevojci Ani na podršci i strpljenju tijekom izrade završnog rada, kao i tokom studija.

Rad posvećujem djedu Ivanu koji me u ranom djetinjstvu uveo u svijet strojarstva.

Alen Hlevnjak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ALEN HLEVNJAK**

Mat. br.: **0035185081**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**TOČKASTO ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE
VISOKOLEGIRANIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**SPOT RESISTANCE WELDING OF HIGH ALLOYED STAINLESS
STEELS**

Opis zadatka:

Opisati i obrazložiti fiziku elektrootpornog zavarivanja i detaljno analizirati sve opcije izvođenja. Posebno navesti ključne parametre pri točkastom zavarivanju kao i njihov utjecaj na geometriju spoja. Dati pregled materijala za izradu elektroda. Navesti specifične primjere iz primjene kao i mogućnosti automatizacije i robotizacije.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je propisati tehnologiju točkastog elektrootpornog zavarivanja na limu od visokolegiranog nehrđajućeg čelika. Ustanoviti plan pokusa za kvantifikaciju utjecaja struje zavarivanja, vremena zavarivanja i sile na elektrode. Uz primjenu norme HRN EN ISO 15614-12 načiniti odgovarajuće ispitne epruvete i ispitati kvalitetu zavarenog spoja. U konačnici dati preporuke za zavarivanje i definirati eventualna poboljšanja oblika elektrode i parametara zavarivanja.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

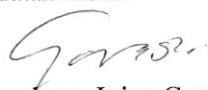
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

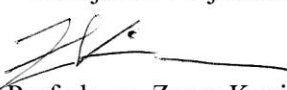
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ivica Garašić
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	4
POPIS TABLICA	6
POPIS OZNAKA I KRATICA	7
SAŽETAK	8
1. UVOD	9
2. ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE	11
2.1. Usporedba elektrootpornog točkastog s ostalim postupcima zavarivanja	11
2.2. Općenito o postupku i varijante	13
2.2.1. Elektrootporno točkasto indirektno zavarivanje	14
2.2.2. Elektrootporno bradavičasto zavarivanje	15
2.3. Jouleov zakon	16
2.4. Parametri EO točkastog zavarivanja i proces spajanja	18
2.5. Izgled EO točkasto zavarenog spoja	22
2.6. Oprema za EO točkasto zavarivanje	24
2.6.1. Sustav zaštite od ozljeđivanja operatera	25
2.6.2. Primjer tržišne specifikacije uređaja za EO točkasto zavarivanje	26
2.7. Elektrode za EO točkasto zavarivanje	27
2.7.1. Funkcije elektroda	29
2.7.2. Materijali elektroda	29
2.8. Automatizacija i robotizacija zavarivanja	30
2.8.1. Programiranje robota	31
2.8.1.1. On-line metoda programiranja	31
2.8.1.2. Off-line programiranje	32
2.8.1.3. Hibridno (mješano) programiranje	32
2.9. Primjena EO točkastog zavarivanja	33
2.10. Zavarljivost metala i legura EO točkastim zavarivanjem	34

3. EKSPERIMENTALNI DIO	35
3.1. Materijal ispitnih uzoraka i norma	35
3.2. Opis stroja	36
3.3. Tijek eksperimenta	42
3.3.1. Priprema ispitnih uzoraka	42
3.3.2. Određivanje parametara zavarivanja	45
3.3.2.1. Vrijeme zavarivanja	45
3.3.2.2. Jakost struje zavarivanja	46
3.3.2.3. Sila pritiska elektroda	46
3.3.3. Parametri za svaki pojedini uzorak	47
3.3.4. Izgled zavarenih uzoraka	48
3.3.5. Vizualna analiza uzoraka	49
3.3.6. Ispitivanje uzoraka na kidalici	51
3.3.6.1. Tijek ispitivanja na kidalici	52
3.3.6.2. Izgled ispitnih uzoraka nakon ispitivanja na kidalici	54
3.3.6.3. Rezultati ispitivanja na kidalici	56
3.3.6.4. Srednji promjeri točaka dodira između dva zavarena lima ...	57
3.3.6.5. Vlačna čvrstoća uzoraka	58
4. ZAKLJUČAK	59
LITERATURA	60
PRILOZI	63

POPIS SLIKA

Slika 1. Klasifikacija postupaka elektrootpornog zavarivanja	10
Slika 2. Shematski prikaz direktnog točkastog zavarivanja [6]	13
Slika 3. Ilustracija indirektnog točkastog zavarivanja [7]	14
Slika 4. Shema bradavičastog zavarivanja [8]	15
Slika 5. Električni otpori pri točkastom zavarivanju u ovisnosti o temperaturi [9]	16
Slika 6. Dijagram ovisnosti sile zavarivanja i jačine struje o vremenu [10]	18
Slika 7. Istiskivanje [8]	19
Slika 8. Vremenski ciklusi pri elektrootpornom zavarivanju [3]	20
Slika 9. Fotografija postupka s izgledom zavarenog spoja [14]	22
Slika 10. Usporedba elektrootpornog i TIG zavarenog spoja [3]	22
Slika 11. EO točkasto zavareni spoja triju aluminijskih limova [14]	23
Slika 12. Shema uređaja za EO točkasto zavarivanje [15]	24
Slika 13. Uređaji za EO točkasto zavarivanje [16], [17]	25
Slika 14. Prikaz ozljeđivanja na mjestu između dvije elektrode [18]	25
Slika 15. Uređaj za točkasto zavarivanje Tecna 4645 sa specifikacijom [19]	26
Slika 16. Elektrode za EO točkasto zavarivanje [20]	27
Slika 17. Tri najčešća tipa vrha elektrode [23]	28
Slika 18. Cilindrična ravna elektroda za EO točkasto zavarivanje [7]	28
Slika 19. Robot za elektrootporno točkasto zavarivanje [26]	30
Slika 20. Zavarivanje karoserije automobila [28]	33
Slika 21. Stroj za EO točkasto zavarivanje na kojem je izveden eksperiment	36
Slika 22. Priključak komprimiranog zraka i rashladne vode s uređajem	37
Slika 23. Shematski prikaz ispona i razmaka	38
Slika 24. Manometar, nauljivač i elektromagnetski razvodnik	39
Slika 25. Kontrolni ormarić tipa KD2-250	40

Slika 26. Limovi prije rezanja	42
Slika 27. Propisane dimenzije za ispitne uzorke [34]	43
Slika 28. Rezanje ispitnih uzoraka na strojnim škarama	44
Slika 29. Ispitni uzorci nakon rezanja	44
Slika 30. Reguliranje vremena	45
Slika 31. Reguliranje jakosti struje zavarivanja	46
Slika 32. Reguliranje pritiska između elektroda	46
Slika 33.a Lice zavarene točke (kontakt: radni komad – gornja elektroda)	48
Slika 33.b Naličje zavarene točke (kontakt: radni komad – donja elektroda)	48
Slika 34. Promjeri i srednja vrijednost promjera [35]	49
Slika 35.a Prikaz srednjeg promjera točke zavora	50
Slika 35.b Prikaz srednjih promjera ZUT-a	50
Slika 36. Kidalica EU40MOD	51
Slika 37. Ispitivanje čvrstoće zavora	52
Slika 38. Ispitni uzorak neposredno prije loma	53
Slika 39. Uzorci 1-4 nakon ispitivanja na kidalici	54
Slika 40. Uzorci 5-8 nakon ispitivanja na kidalici	55
Slika 41. Prikaz vlačnih čvrstoća	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela nekih od postupaka zavarivanja prema načinu zavarivanja [2]	9
Tablica 2. Orijentacijska primjena postupaka zavarivanja s obzirom na debljinu materijala koji se zavaruje [4]	11
Tablica 3. Relativni pokazatelj cijene, stupnja mehaniziranosti i potrebe za DM-om [4]	12
Tablica 4. Ocjena međusobne zavarljivosti metala i legura postupcima EO zavarivanja [29]	34
Tablica 5. Kemijski sastav NIROSTA [®] 1.4541 čelika [30]	35
Tablica 6. Iznos parametara zavarivanja	47
Tablica 7. Promjeri točke zavara i zone utjecaja topline	49
Tablica 8. Rezultati maksimalnih vlačnih sila	56
Tablica 9. Promjeri ispupčenja	57
Tablica 10. Vlačna čvrstoća ispitnih uzoraka	58

POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q	J	Količina topline
I_Z	A	Struja zavarivanja
t_Z	s	Vrijeme zavarivanja
R_1, R_2	Ω	Vlastiti otpori materijala
R_{1-E}	Ω	Otpor: materijal - gornja elektroda
R_{2-E}	Ω	Otpor: materijal - donja elektroda
R_{kl2}	Ω	Kontaktni otpor: materijal - materijal
S	mm^2	Ploština presjeka vodiča
L	mm	Dužina vodiča
ρ	$\Omega_{\text{mm}}^2/\text{m}$	specifični električni otpor
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
F_M	N	Maksimalna vlačna sila
A	mm^2	Ploština
d_s	mm	Srednji promjer točke zavara
d	mm	Srednji promjer točke dodira između dva zavarena lima

Kratika	Opis
EO	Elektrootporno
GM	General Motors
ISO	International standard organization
LED	Light-emitting diode
MAG	Metal active gas
MIG	Metal inert gas
RWMA	Resistance Welding Manufacturers Association
TIG	Tungsten inert gas
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U ovome je radu opisana i obrazložena fizika elektrootpornog zavarivanja te su analizirane opcije izvođenja EO točkastog zavarivanja. Dan je pregled usporedbe s ostalim postupcima, općenito o postupku i varijante. Posebno su navedeni ključni parametri pri točkastom zavarivanju kao i njihov utjecaj na geometriju spoja. Opisana je oprema potrebna za EO točkasto zavarivanje. Također, dan je pregled oblika i materijala za izradu elektroda. Nevedeni su specifični primjeri primjene kao i mogućnost automatizacije i robotizacije.

U eksperimentalnom dijelu rada opisan je stroj na kojem je izveden eksperiment, materijal i priprema uzoraka prema normi HRN EN ISO 15614-12. Tijek eksperimenta obrazložen je po koracima s kvantifikacijom utjecaja struje zavarivanja, vremena zavarivanja i sile na elektrode. U konačnici je ispitana kvaliteta zavarenog spoja i definirana su poboljšanja parametara zavarivanja.

Ključne riječi: elektrootporno točkasto zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika, parametri

1. UVOD

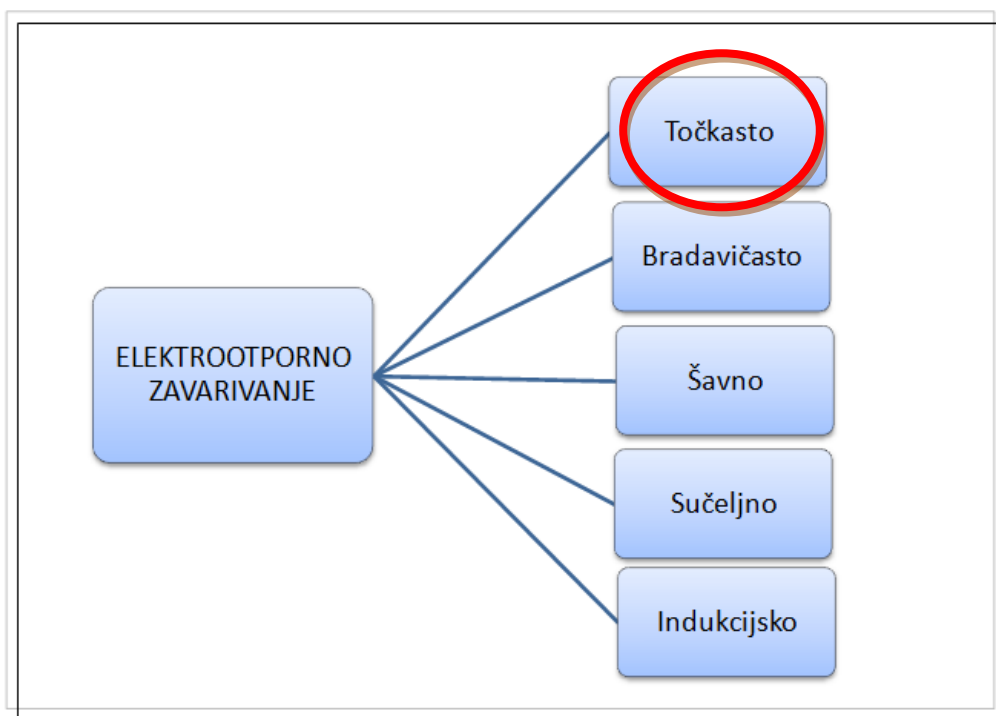
Zavarivanje je već duže vrijeme nezaobilazna tehnologija pri spajanju materijala u gotove proizvode. Postoji mnogo različitih postupaka zavarivanja, ali svi imaju jedan cilj, a to je što bolje, učinkovitije i kvalitetnije spojiti dva ili više materijala. Općenito, elektrootporno zavarivanje jedan je od najbolje automatiziranih i robotiziranih postupaka zavarivanja, a obuhvaća grupu postupaka kod kojih se materijal zagrijava toplinom stvorenom električnim otporom. Zavareni spoj nastaje djelovanjem sile pritiska između elektroda. Električnim otporom stvara se toplina koja se koristi za zagrijavanje određene količine materijala na temperaturu zavarivanja, kao i za zagrijavanje materijala u okolnoj zoni. Najčešće se koristi izmjenična struja niskog napona i visoke jakosti te kratkog trajanja [1].

Ovaj postupak zavarivanja spada u skupinu postupaka uz djelovanje pritiska, odnosno spajanje metalnih dijelova pritiskom i to bez korištenja dodatnog materijala, za razliku od druge skupine postupaka gdje se zavaruje taljenjem, a to je spajanje metalnih dijelova u rastaljenom stanju na mjestu spajanja, s korištenjem ili bez korištenja dodatnog materijala, te bez djelovanja pritiska ili udaraca. U tablici 1 prikazana je podjela nekih od postupaka zavarivanja taljenjem te zavarivanja pritiskom.

Tablica 1. Podjela nekih od postupaka zavarivanja prema načinu zavarivanja [2]

Zavarivanje taljenjem	Zavarivanje pritiskom
Eletrolučno	Kovačko
Aluminotermijsko	Trenjem
EPT (Elektro pod troskom)	Hladno
Elektronskim snopom	ELEKTROOTPORNO
Ljevačko	Eksplzijom
Laserom	Trenjem
Plinsko	Indukcijsko

Elektrootporno zavarivanje ima nekoliko podskupina, kao što je to klasificirano na slici 1, no u ovome će završnom radu prvenstveno biti riječ o točkastom elektrootpornom zavarivanju.



Slika 1. Klasifikacija postupaka elektrootpornog zavarivanja

2. ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE

Elektrootporno točkasto zavarivanje je najzastupljeniji i jedan je od najstarijih postupaka električnog zavarivanja u današnjoj industriji. Zavar nastaje kombinacijom triju faktora, a to su: toplina (koja se dobije kombinacijom napona, struje zavarivanja i električnog otpora), pritisak i vrijeme. Iznosi ovih faktora ovise o vrsti materijala koji se zavaruje, stanju njegove površine te o debljini samog materijala, o čemu će riječ biti kasnije [3].

2.1. Usporedba elektrootpornog točkastog s ostalim postupcima zavarivanja

U tablici 2 prikazana je orijentacijska primjena postupaka zavarivanja s obzirom na debljinu materijala koji se zavaruje. Iz nje je vidljivo da se elektrootporno točkasto zavarivanje koristi za tanje materijale, najčešće debljine 0,25 – 5 mm.

Tablica 2. Orijentacijska primjena postupaka zavarivanja s obzirom na debljinu materijala koji se zavaruje [4]

Postupak zavarivanja	Debljina materijala [mm]
Ultrazvučno	Do 1
Mikroplazma	0,25 - 2
Laser	Do 3
EO TOČKASTO	0,25 - 5
Plazma	0,5 - 8
Plinsko ($C_2H_2 + O_2$)	0,5 – 8
MIG	0,5 – 50
TIG	4 – 10
MAG	3 – 50
REL	2 – 150
EPT	25 - 450
Aluminotermijsko	> 10

Napomena: vrijednosti u zagradama odnose se na debljinu materijala koji se zavaruje u više prolaza [4]

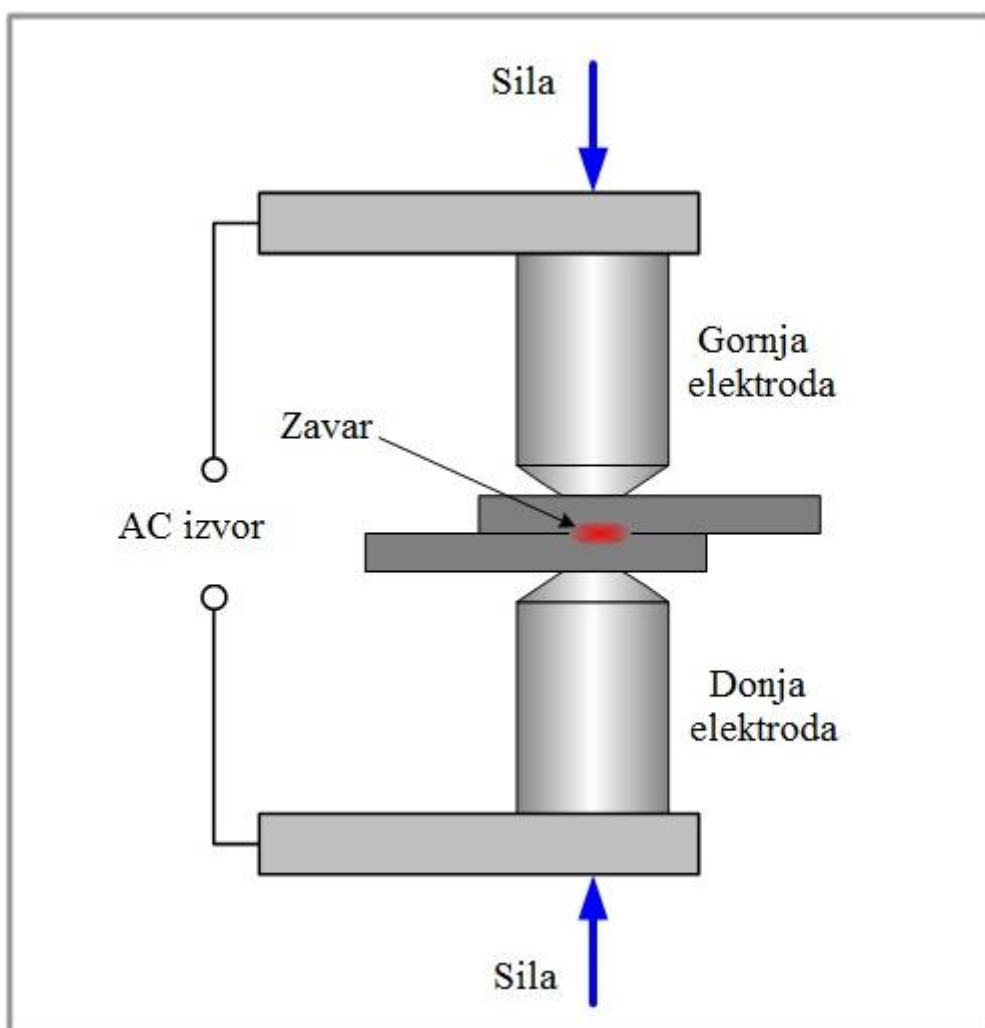
U tablici 3 je uspoređeno 18 postupaka zavarivanja iz koje se može vidjeti indeks cijene uređaja za pojedini postupak, stupanj mehanizacije i zahtjev za dodatnim materijalom (DM).

Tablica 3. Relativni pokazatelj cijene, stupnja mehaniziranosti i potrebe za DM-om [4]

Postupak zavarivanja	Oznaka postupka	Indeks cijene uređaja	Stupanj mehanizacije R – ručni A – automatski PA – poluautomatski	Dodatni materijal (DM)
Ručno elektrolučno	REL	1	R	elektroda
Elektrolučno taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina	MAG	1,5 - 5	PA, A	zaštitni plin (Ar ili He) + žica (DM)
Elektrolučno pod zaštitnim praškom	EP	10	PA, A	zaštitni prašak + žica
Elektrootporno pod troskom	EPT	> 20	A	troska + žica
Elektrolučno netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina	TIG	> 2		zaštitni plin (Ar ili He) sa ili bez žice (DM)
Elektrolučno netaljivom elektrodom u (impulsno) u zaštiti inertnog plina	TIG	6 - 10	A	zaštitni plin (Ar ili He) sa ili bez žice (DM)
Elektrolučno taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina	MIG	1,5 - 5	PA, A	zaštitni plin (Ar ili He) + žica (DM)
Elektrootporno točkasto	EOT	1,5 - 15	R, A	Bez DM
Elektrootporno savno	EOŠ	0,5 – 10	R, A	Bez DM
Elektrootporno sučeono	EOS	0,5 – 10	PA, A	Bez DM
Elektrootporno bradavičasto	EOB	1,5 – 15	PA, A	Bez DM
Elektrootporno iskrenjem	EOI	4 - 50	PA, A	Bez DM
Elektrootporno tupo	EOT	4 - 50	PA, A	Bez DM
Plinsko zavarivanje	PZ	> 0,2	R, A	Gorivi plin i kisik bez ili sa žicom (DM)
Aluminotermijsko	ATZ	> 0,2	R, A	Termit ($Al_2O_3 + Fe_3O_4$)
Mikroplazma	MPZ	> 2	R, A	Plazmeni plin obično bez žice (DM)
Elektronskim mlazom (snopom)	EMZ	10 – 50	A	Bez DM
Difuzijsko	DZ	> 10	A	Bez DM

2.2. Općenito o postupku i varijante

Kao što i samo ime kaže, elektrootporno se zavarivanje zasniva na električnom otporu koji uzrokuje tzv. *Jouleovu toplinu*¹ između dviju elektroda gdje se nalazi radni komad pritisnut silom F . Na slici 2 shematski je ilustrirano direktno (klasično) elektrootporno točkasto zavarivanje kod kojeg se elektrode nalaze jedna nasuprot drugoj pritišćući radni komad [5].

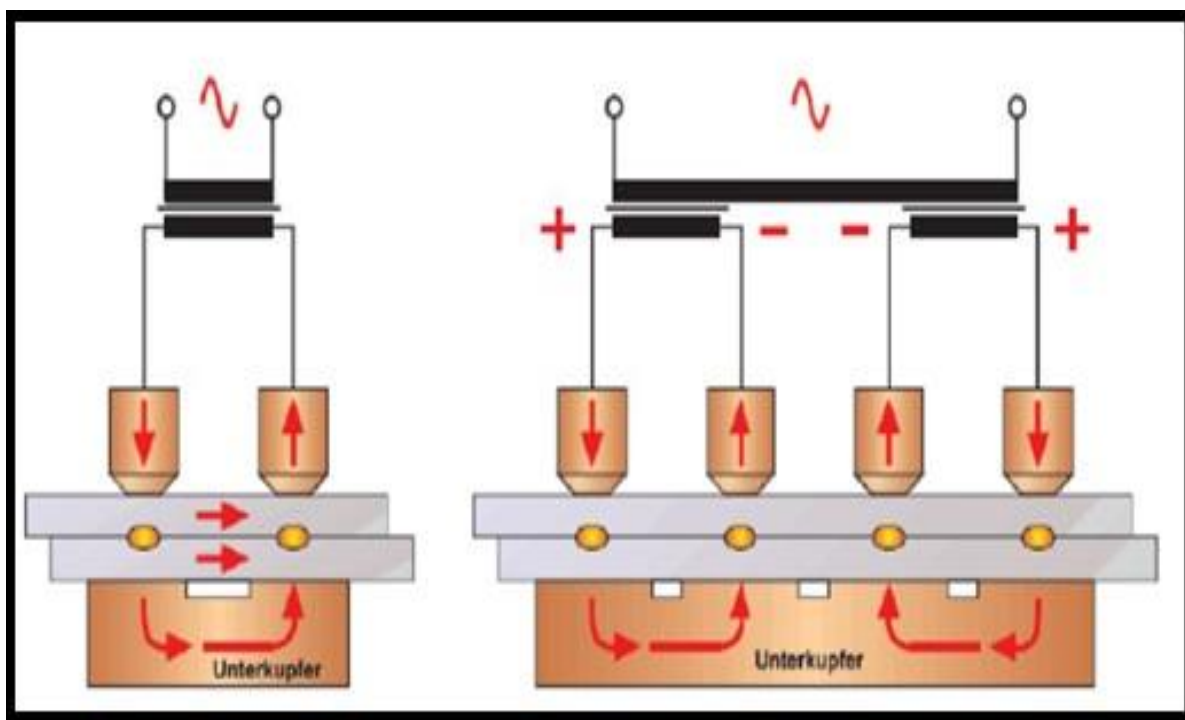


Slika 2. Shematski prikaz direktnog točkastog zavarivanja [6]

¹ Jouleova toplina - toplina koju proizvede električna struja prolaskom kroz vodič tijekom nekoga vremena, nazvana po engleskom fizičaru Jamesu Prescottu Jouleu (Salford, 1818. - Sale, 1889.)

2.2.1. Elektrootporno točkasto indirektno zavarivanje

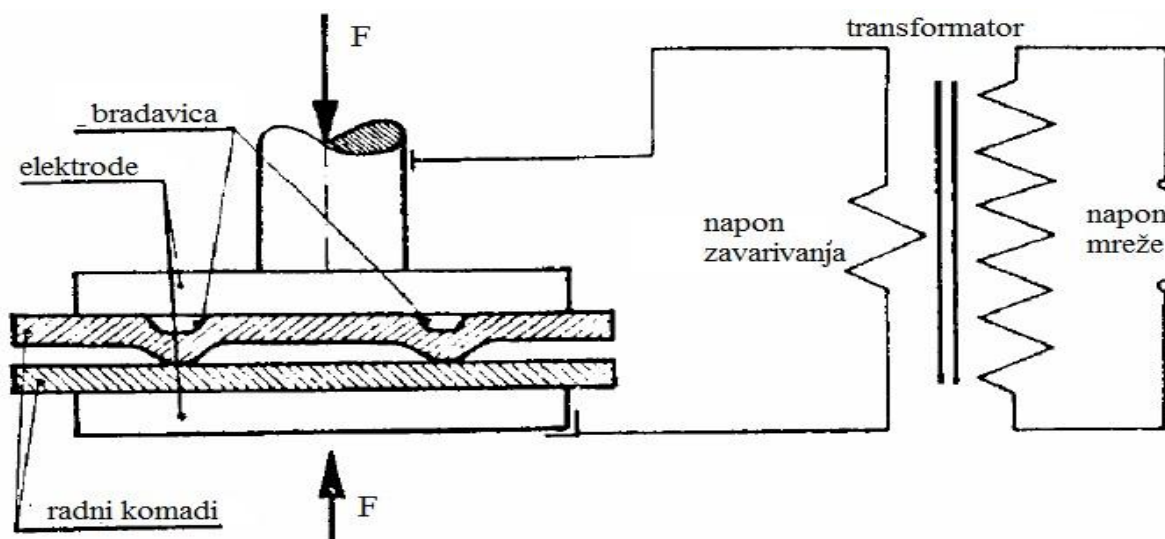
Postoji i indirektno elektrootporno točkasto zavarivanje kod kojeg se elektrode nalaze jedna pored druge, a ispod njih je bakrena podloga. Koristi se u slučajevima kada je teško s obje strane direktnim postupkom pritisnuti radni komad. Lijevo na slici 3 se nalazi jedan par elektroda, a desno više parova elektroda spojenih na zajednički izvor struje za indirektno zavarivanje [7].



Slika 3. Ilustracija indirektnog točkastog zavarivanja [7]

2.2.2. Elektrootporno bradavičasto zavarivanje

Potreba za što većom proizvodnošću dovela je do razvoja elektrootpornog bradavičastog zavarivanja koje je u osnovi slično kao točkasto zavarivanje s tim da se na jednom od limova koji se zavaruju prethodno naprave ispupčenja (bradavice) koje naliježu na drugi lim i time određuju put struji u zatvorenom strujnom krugu. Kada poteče električna struja, izbočina se slegne. Na tom se mjestu materijal rastali, te nastane točkasti zavar, sličan onom koji se dobije točkastim zavarivanjem. Slika 4 prikazuje shemu bradavičastog zavarivanja kada se jednim ciklusom ostvare zavari na dva mjesta istovremeno. Moguće je tako odjednom napraviti n zavara.



Slika 4. Shema bradavičastog zavarivanja [8]

Prednost bradavičastog zavarivanja u odnosu na točkasto je u tome što u jednom prolazu nastaje onoliko točaka koliko je bradavica pripremljeno na limu, tj. u većoj proizvodnosti. Osim toga, elektrode traju znatno duže jer nisu opterećene kao kod točkastog. Mana bradavičastog zavarivanja je potreba za velikom snagom i silom pritiska, što dodatno komplicira i poskupljuje sam uređaj za zavarivanje.

Koristi se u strojogradnji za privarivanje vijaka i matica, čepova, kutnika, te u industriji igračaka, bijele tehnike (gdje je zavarivanje u velikim količinama). Metali koji se najčešće ovako zavaruju su pocinčani limovi, aluminij i bronca [8].

2.3. Jouleov zakon

Količina topline koja nastaje pri zavarivanju električnim otporom određuje se prema Jouleovom zakonu:

$$Q = \int_0^t R(t) \cdot I_z^2(t) \cdot dt \quad (1)$$

pri čemu je:

I_z - struja zavarivanja [A],

t - vrijeme zavarivanja [s],

R - ukupni omski otpor između elektroda [Ω], koji se može definirati kao zbroj pojedinih otpora: $R = R_{I-E} + R_I + R_{kl2} + R_2 + R_{2-E}$

gdje su:

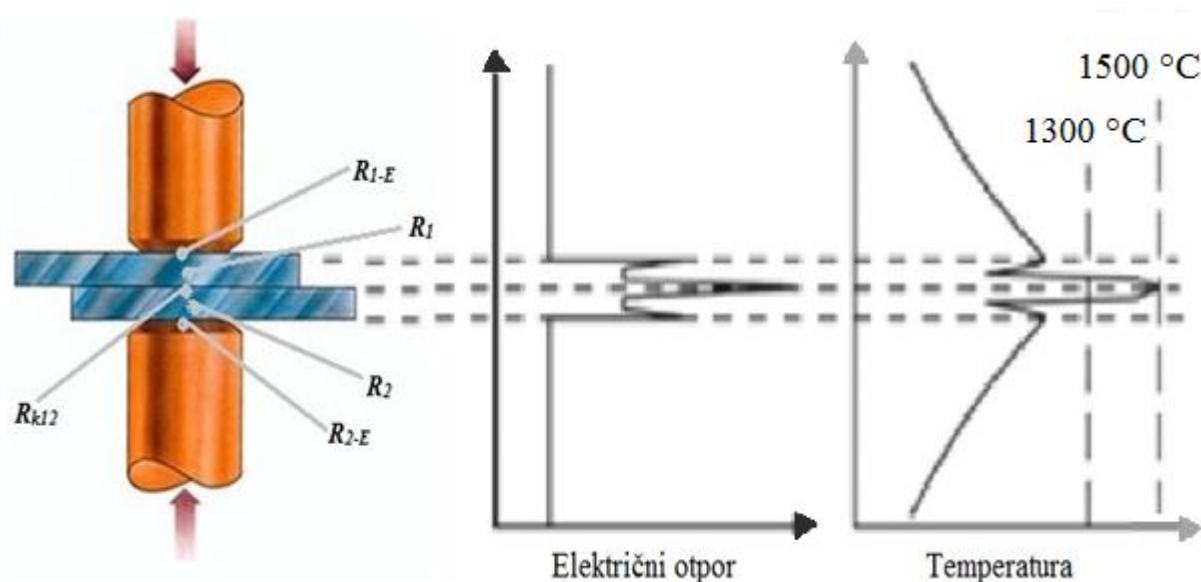
R_I i R_2 – vlastiti otpori materijala,

R_{I-E} – otpor: materijal - gornja elektroda,

R_{2-E} – otpor: materijal - donja elektroda i

R_{kl2} – kontakti otpor: materijal - materijal.

Na slici 5 prikazani su električni otpori, odnosno njihove pozicije u ovisnosti s temperaturom.



Slika 5. Električni otpori pri točkastom zavarivanju u ovisnosti o temperaturi [9]

U početku zavarivanja najveći je kontaktni otpor R_{k12} , uslijed nehomogenosti i hrapavosti dodirnih površina. Kontakt se ostvaruje na mjestu dodira, tj. lokalnih ispupčenja, što znači da struja teče samo kroz mali dio presjeka. Iz tog razloga se na mjestu dodira javlja veliki kontaktni otpor. Ako se istovremeno djeluje odgovarajućom silom pritiska, površina kontakta se povećava, a kontaktni otpor smanjuje.

Povišenjem temperature kontaktni otpor se također smanjuje, što je posljedica rasta specifičnog otpora sloja metala uz kontakt, smanjenja otpora oksidnog sloja te povećanja broja i površine fizičkih kontakata među elektrodama kao i plastične deformacije zagrijanog metala.

Kontaktni otpori materijal – elektroda (R_{1-E} i R_{2-E}) zadržavaju približno konstantne vrijednosti za vrijeme zavarivanja. Ovi kontaktni otpori su znatno manji od kontaktnog otpora R_{k12} jer elektrode dobro provode električnu struju.

Vlastiti otpori materijala R_1 i R_2 se određuju izrazom:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

pri čemu je:

S – ploština presjeka vodiča, $[\text{mm}^2]$,

L – dužina vodiča, $[\text{mm}]$ i

ρ – specifični električni otpor, $[\Omega_{\text{mm}}^2/\text{m}]$ (raste s porastom temperature).

Specifični električni otpor je najvažnija termo-fizikalna karakteristika materijala pri elektrotopnom zavarivanju, jer omogućuje da se izvor topline od pretežno površinskog (u početnoj fazi zavarivanja, koja traje do trenutka vremena t_i , kada kontaktni otpori postaju zanemarivi) promijeni u zapreminski (poslije t_i). Specifični otpor legura je određen njihovim sastavom (veći je nego kod čistih metala) i termomehaničkom obradom, a u manjoj mjeri i mikrostrukturom. Prema tome, kontaktni otpor djeluje kratkotrajno i brzo opada do zanemarive vrijednosti, kada je ukupni otpor minimalan (trenutak t_i), dok se vlastiti otpor povećava do maksimalne vrijednosti, poslije čega se njegova vrijednost smanjuje [8].

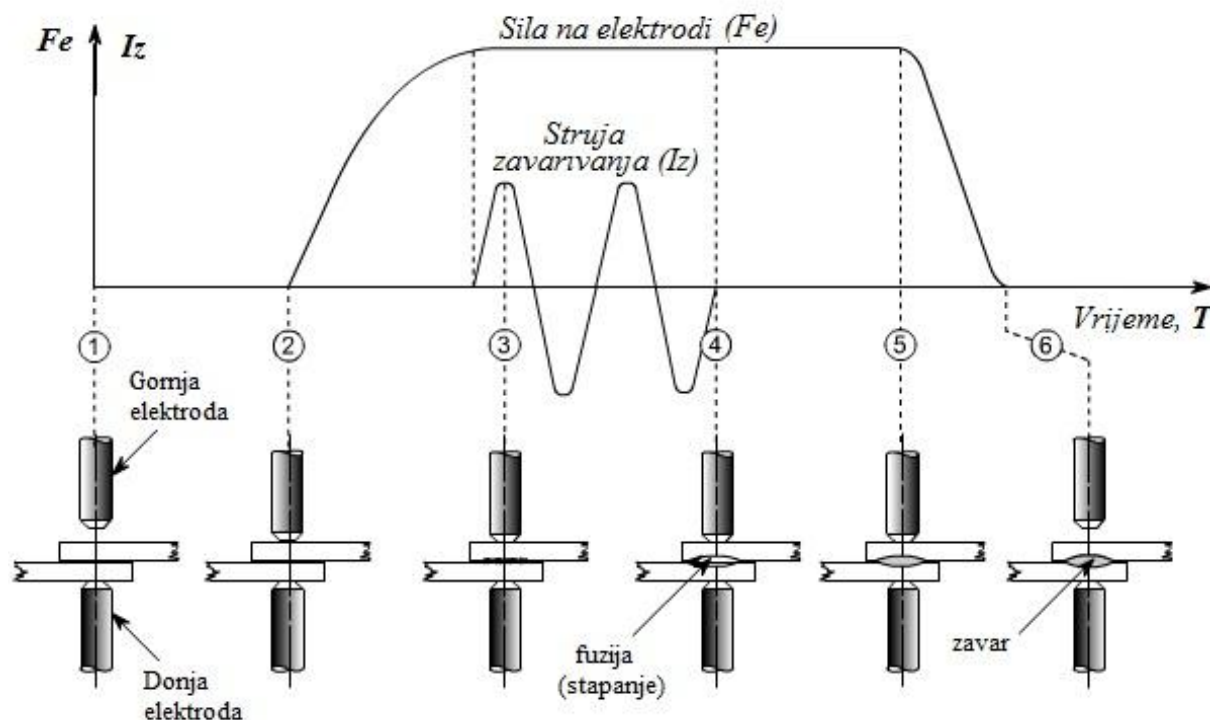
2.4 Parametri EO točkastog zavarivanja i proces spajanja

Na kvalitetu elektrootporno zavarenih spojeva najviše utječu:

- 1) jačina struje zavarivanja, I_z [A]
- 2) sila pritiska na elektrode, F [N]
- 3) vrijeme zavarivanja, t_z [s]
- 4) dimenzije vrhova elektroda, d_e [mm]
- 5) vrijeme prijanjanja elektroda, t_p [s] i
- 6) vrijeme održavanja sile pritiska na elektrodama (držanje), t_D [s].

Osim navedenih parametara, mora se voditi računa o karakteristikama osnovnog materijala, zahtjevima za vanjski izgled zavarenih spojeva, potrebnoj klasi kvalitete spoja, kvaliteti opreme i uređaja za zavarivanje te njihovoj kontroli.

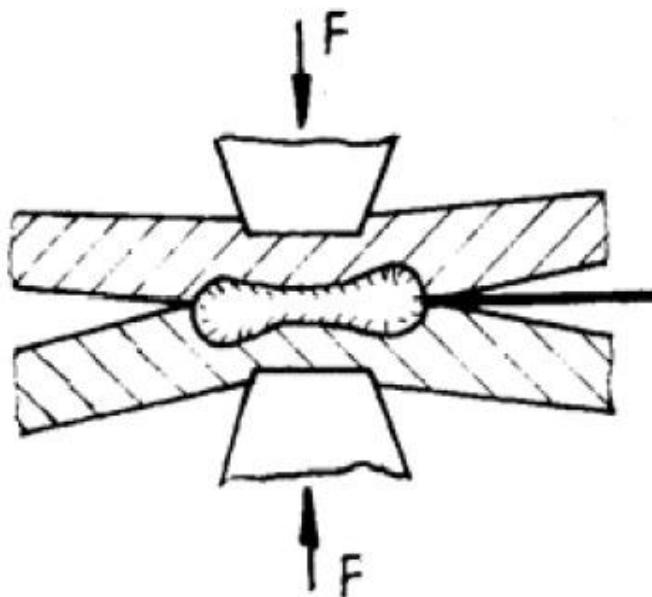
Jačina struje i vrijeme zavarivanja su međusobno povezani parametri, a u kombinaciji sa silom pritiska na elektrode njihov se odnos može prikazati dijagramom, kakav je na slici 6. Njihov se odnos može definirati integralnim izrazom za količinu topline (Jouleova topline), kao što je to navedeno u odlomku 2.3.



Slika 6. Dijagram ovisnosti sile zavarivanja i jačine struje o vremenu [10]

Iz dijagrama prikazanog na slici 6 vidljivo je da ciklus zavarivanja počinje pritiskanjem gornje elektrode o donju nepomičnu elektrodu zbog potrebe za fiksacijom radnog komada smještenog između dviju elektroda. Pri tome je važno osigurati dovoljnu silu pritiska, jer će se u suprotnom pojaviti nepoželjna pojava, tzv. istiskivanje (slika 7).

Istiskivanje se uočava na početku procesa pri relativno brzom zagrijavanju i nedovoljnoj sili pritiska, ali i na kraju procesa uslijed prekomjernog zagrijavanja.



Slika 7. Istiskivanje [8]

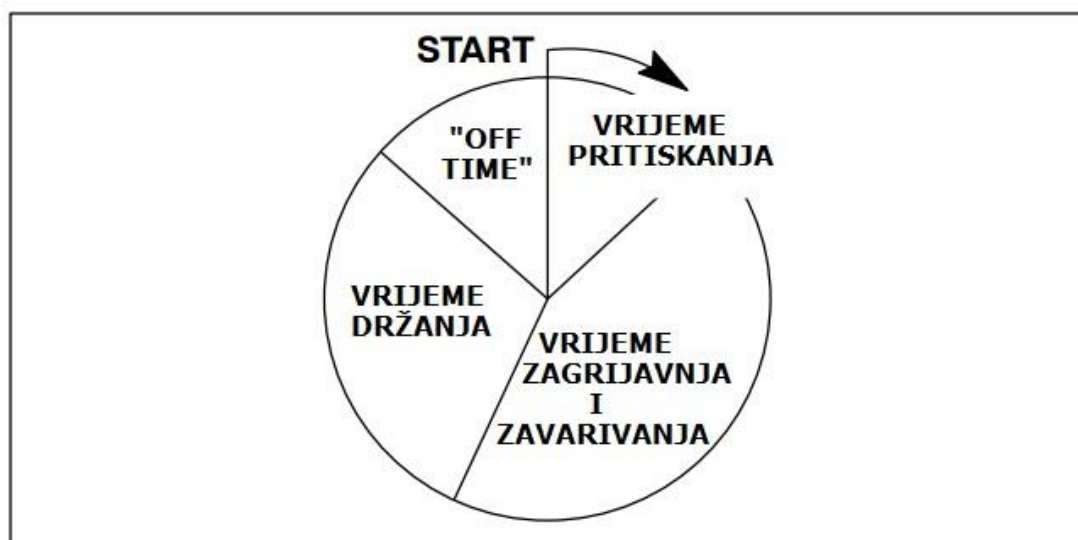
Kada se radni komad pritisne i postane fiksiran, uključuje se struja vrlo visoke jakosti. Površine radnog komada koje su u kontaktu zagrijavaju se vrlo brzo na visoku temperaturu jer je upravo na tom mjestu najveći otpor u strujnom krugu. Kombinacijom pritiska između elektroda i vrućim (rastaljenim) metalom, koji se hladi pod pritiskom, nakon čega se elektrode razdvoje, dobije se točkasto zavareni spoj prikazan na slici 9.

Kako uvijek postoji minimalna jačina struje potrebna za dobivanje zavarenog spoja, vrijeme zavarivanja ne može se povećati preko neke vrijednosti. Minimalna vrijednost jačine struje ovisi od karakteristici osnovnog materijala, debljini limova i stanju njihovih površina, dimenziji vrha elektrode i sile pritiska, kao i o temperaturi metala na mjestu gdje se površine dodiruju. U većini slučajeva koristi se struja od nekoliko tisuća ampera (nekoliko kA). Tako visoka vrijednost struje koja teče kroz relativno visoku otpornost osnovnog materijala uzrokuje jako zagrijavanje u kratkom vremenu.

Zagrijavanje pri elektrootpornom zavarivanju je kratkotrajno (od mikrosekunde do nekoliko sekundi) i neravnomjerno, pri čemu se najviše zagrijava središnji dio točke (jezgra). Na vrijeme zavarivanja utječe debljina radnog komada, snaga pritiska i promjer elektroda.

U početnoj fazi zagrijavanja u jezgri počinje skupljanje krupnih zrna pod djelovanjem sile pritiska, tj. zavarivanje bez taljenja. Daljnjim zagrijavanjem jezgra se tali, a njezinim očvršćivanjem nastaje zavarena točka. Ako se struja isključi prije dostizanja temperature taljenja tada u strukturi zavarene točke nema šupljina i pora, ali nastaju krupno zrno i nemetalni uključci koji smanjuju žilavost spoja. Suprotno tome, tijekom taljenja i očvršćivanja jezgre ispunjavaju se šupljine i pore, što se može spriječiti djelovanjem sile pritiska. Stoga smanjenje pritiska na elektrodama treba kasniti u odnosu na isključenje struje za vrijeme t_k , dovoljno za završetak kristalizacije. Povećanjem debljine komada, hlađenje i kristalizacija se usporavaju, a vrijeme t_k se produžuje. Kod debljih limova (čelik deblji od 6 mm) sila pritiska na elektrodama ne samo da mora djelovati duže, već se treba povećati da bi se spriječila pojava šupljina i pora.

Da bi se ostvario kvalitetan zavar potrebno je kontrolirati upravo vrijeme zavarivanja koje i jest najčešća upravljiva varijabla, pošto je jačina struje često ekonomski nepraktična za kontrolu, ali i nepredvidiva. Na slici 8 prikazana su četiri karakteristična vremena pri elektrootpornom zavarivanju čiji zbroj daje jedan vremenski ciklus zavarivanja [11].



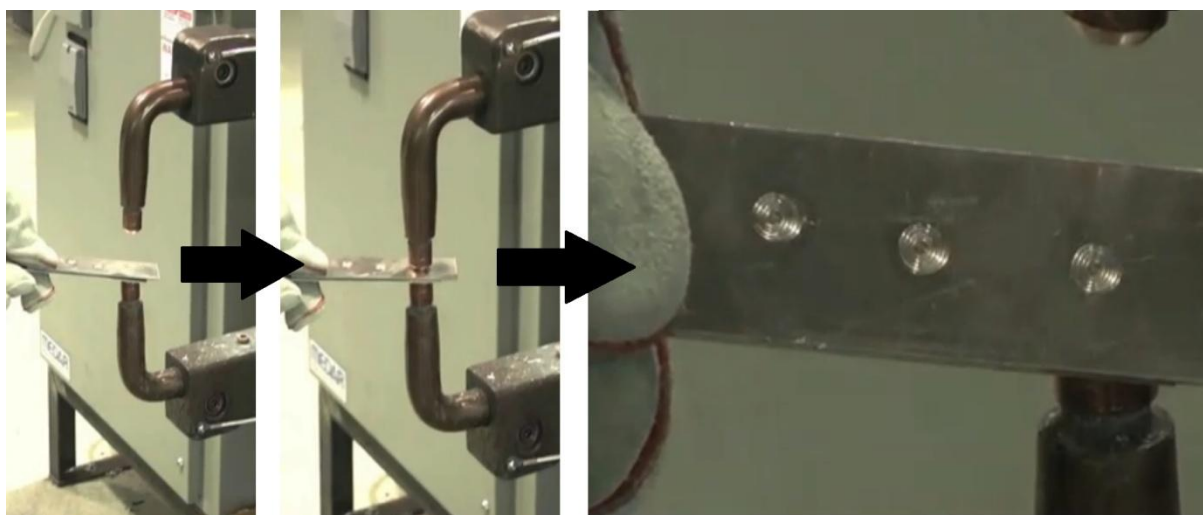
Slika 8. Vremenski ciklusi pri elektrootpornom zavarivanju [3]

„Off Time“ – vrijeme kad su elektrode razdvojene kako bi se omogućilo premještanje materijala za zavarivanje sljedeće točke.

Teško je odrediti točnu vrijednost vremena zavarivanja. Ono mora biti što je kraće moguće. Ako je vrijeme zavarivanja predugo, dolazi do prevelike točke ili prevelikog udubljenja radnog komada na mjestu zavora što nije prihvatljivo [12]. Najčešće se vrijeme zavarivanja kreće u rasponu od 0,1 do 0,63 sekundi ovisno o debljini metala, sile na elektrodama i promjeru samih elektroda [13].

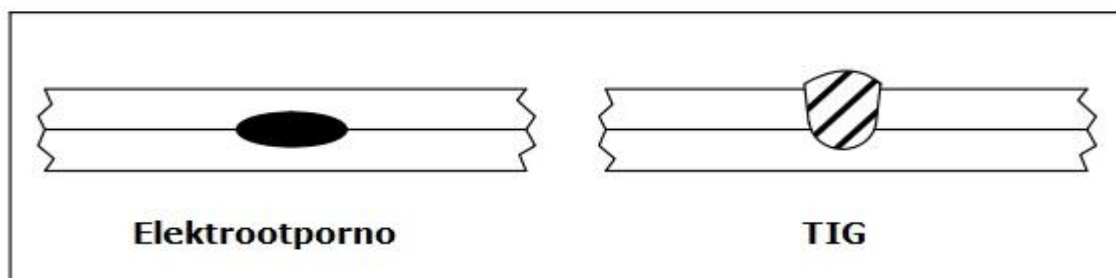
2.5. Izgled EO točkasto zavarenog spoja

Zavarena točka ima dvije osi simetrije, veliku os koja se poklapa s linijom dodira dva lima i malu os koja se poklapa s osi elektroda. U centralnoj zoni zavarene točke je najveće zagrijavanje i najbrže hlađenje, a promjena temperature je različita u različitim pravcima, čime se objašnjava eliptičnost zavarene točke. Na slici 9 prikazan je klasičan postupak točkastog zavarivanja dvaju limova te izgled zavarenog spoja u obliku točke.



Slika 9. Postupak EO točkastog zavarivanja s izgledom zavarenog spoja [14]

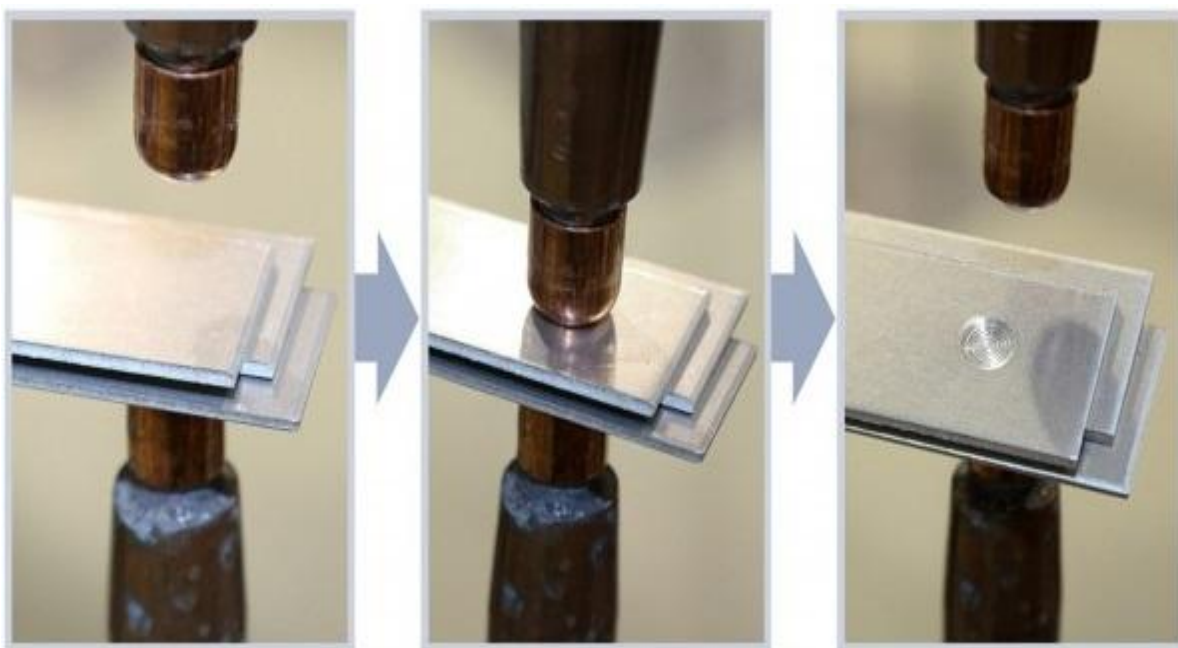
Izgled elektrootporno točkasto zavarenog spoja je jedinstven za razliku od spojeva koji se dobiju ostalim postupcima zavarivanja. Na slici 10 prikazana je usporedba dvaju spojeva. S lijeve strane je elektrootporno zavareni spoj, a s desne strane spoj zavaren TIG postupkom [3].



Slika 10. Usporedba elektrootpornog i TIG zavarenog spoja [3]

TIG spoj moguće je napraviti penetracijom s jedne od strana, dok se elektrootpornim zavarivanjem spoj ostvaruje na sredini dvaju limova.

General Motors (GM) razvio je prvu tehniku zavarivanja dvaju i više laganih aluminijskih limova odjednom u gradnji svojih automobila, za razliku od teških, konvencionalnih materijala. To dovodi do lakših automobila s čime je i potrošnja goriva puno manja. Koristeći ovu tehnologiju eliminira se oko 0,9 kg u masi zakovičnih spojeva iz dijelova karoserije, vrata, haube itd. Osim toga, na kraju životnog ciklusa, recikliranje zavarenih aluminijskih spojeva je jednostavnije nego reciklaža zakovičnih spojeva [14]. Na slici 11 vidljiv je izgled točkasto zavarenog spoja i to triju aluminijskih limova.



Slika 11. EO točkasto zavareni spoja triju aluminijskih limova [14]

2.6. Oprema za EO točkasto zavarivanje

Strojevi za elektrootporno točkasto zavarivanje su konstruirani s fleksibilnim kablovima, kliještima na kojima su elektrode, a u njihovom transformatoru postoji minimalan električni otpor da bi se dobila što veća učinkovitost na izlazu, odnosno na mjestu zavarivanja gdje je i otpor strujnog kruga najveći.

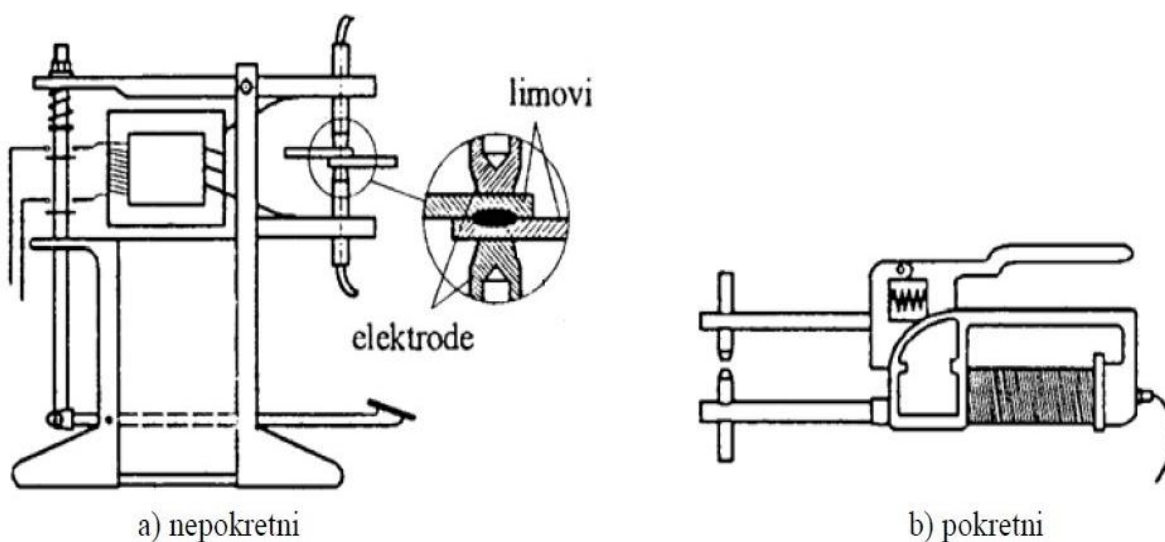
Uređaji se sastoje od sljedećih dijelova:

- prekidača za uključivanje i isključivanje struje,
- dvije elektrode i elemenata za dovođenje struje,
- „papuče“ i mehanizma za ostvarivanje sile pritiska,
- transformatora velike snage koji smanjuje napon sa 380 ili 220V na 0,5–10V.

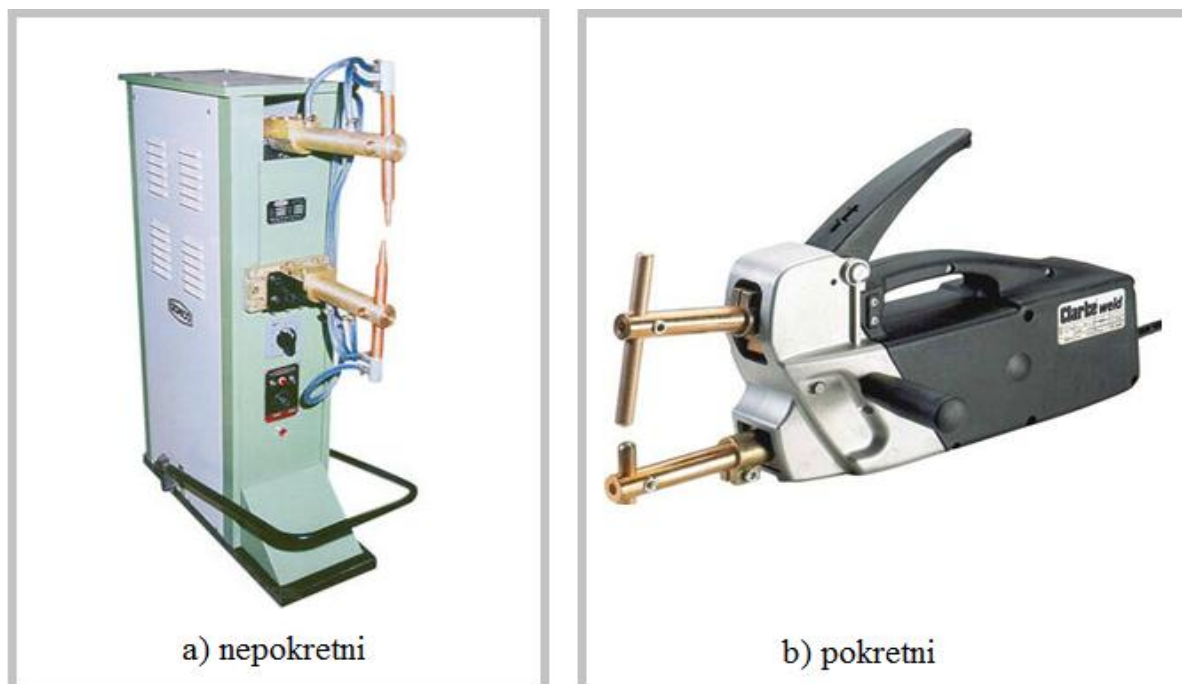
Sila pritiska može se ostvariti:

1. mehanički (nogom, slika 12.a , ili rukom, slika 12.b)
2. automatski (hidraulično, električno ili pneumatski) [15].

Postoje izvedbe nepokretnog i pokretnog izvora struje. Svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke. Kod nepokretnog je glavna prednost što može ostvariti veću silu pritiska elektroda, dok je kod pokretnog glavna prednost njegova mobilnost, odnosno mogućnost zavarivanja na terenu. Na slici 12 shematski su prikazana ova dva tipa uređaja, dok su na slici 13 prikazane njihove fotografije.



Slika 12. Shema uređaja za EO točkasto zavarivanje [15]



Slika 13. Uređaji za EO točkasto zavarivanje [16], [17]

2.6.1. Sustav zaštite od ozljeđivanja operatera

Suvremeni uređaji za EO točkasto zavarivanje opremljeni su sofisticiranim senzorima koji sprječavaju ozljeđivanje operatera tijekom procesa zavarivanja, a ujedno i povećavaju kvalitetu zavarenog spoja. Princip rada je vrlo jednostavan. Senzori detektiraju što se nalazi između dvije elektrode. Ako se tamo nalazi metal, elektrode će se normalno pritisnuti velikom silom i tako će se ostvariti zavar, za razliku ako se između elektroda nađe nemetal kao na primjer zavarivačev dlan, prst (prikazano na slici 14) ili slično, sustav će to detektirati, poslati signal u računalnu jedinicu te trenutno zaustaviti pritiskanje elektroda i spriječiti ozljeđivanje. Vrlo je važno imati ovakav sustav da bi se osigurala što veća sigurnost na radu [18].



Slika 14. Prikaz ozljeđivanja na mjestu između dvije elektrode [18]

2.6.2. Primjer tržišne specifikacije uređaja za EO točkasto zavarivanje

Na slici 15 prikazan je uređaj za točkasto zavarivanje, a desno njegova specifikacija.



Nominalna snaga na 50%: 16 kVA
 Maksimalna snaga zavarivanja: 35 kVA
 Protok struje strujnog kruga: 12,5 kA
 Maksimalna struja zavarivanja čelika: 10 kA
 Toplina protoka struje na 100%: 3300 A
 Napon struje praznog hoda: 3,4 V
 Napajanje: 400 V/50 Hz
 Presjek kabla L=30m: 10 mm²
 Tromi osigurač: 32 A
 Minimalna dubina elektroda: 230 mm
 Maks. Pritisak elektrode (6 bar): 240 daN
 Korak elektroda: 8-44 mm
 Maksimalna dubina elektroda: 550 mm
 Maks. Pritisak elektrode (6 bar): 115 daN
 Korak elektroda: 15-85 mm
 Promjer ruke: 36 mm
 Promjer držača elektrode: 19 mm
 Standardni stožasti promjer elektrode: 12,7 mm
 Dobava komprimiranog zraka: 6,5 bar
 Zrak za 1000 točkastih zavarivanja (6bar): 4,3 Nm³
 Vodeno hlađenje: 2,5 l/min
 Buka: 770 dB
 Radni hod: 20 mm
 Vrijeme zavarivanja: 21 ciklus
 Struja zavarivanja: 9,4 kA
 Broj zavara u minuti: 10
 Težina stroja 133 kg

Slika 15. Uređaj za točkasto zavarivanje Tecna 4645 sa specifikacijom [19]

2.7. Elektrode za EO točkasto zavarivanje

Elektrode su jako važan dio samog stroja. Postoje u raznim veličinama i oblicima kao što je to prikazano na slici 16, a funkcija im je svima jednaka – što učinkovitije prihvatiti i zavariti radni komad.



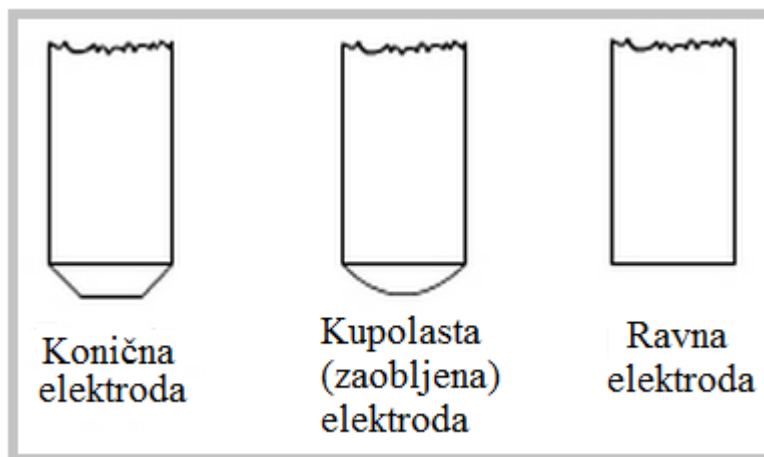
Slika 16. Elektrode za EO točkasto zavarivanje [20]

Kao što se vidi na slici 16 oblika ima mnogo, ali mogu se izdvojiti tri najvažnija, a to su elektrode s vrhom u obliku:

- krnjeg stošca, tj. konične elektrode,
- kupole, tj. zaobljene elektrode,
- ravne plohe.

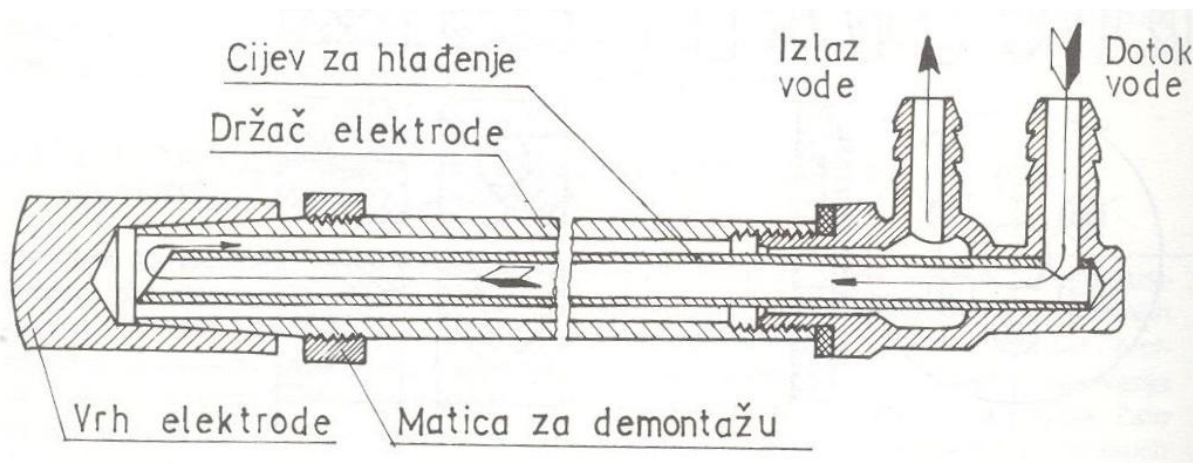
Konične elektrode imaju kut konusa u iznosu od 120° do 140° , a koriste se za zavarivanje feritnih materijala kao što su niskougljični, ugljični i nehrđajući čelik, lijevano i kovano željezo [21]. Kupolaste elektrode, čiji radijus kupole varira od 50 mm do 100 mm, mogu izdržati veća opterećenja i temperature bez pojave oštećenja te se obično koriste za

zavarivanje neferitnih metala, kao što su aluminij, magnezij, titan, cink [22]. Elektrode s ravnim vrhom koriste se u uvjetima gdje je zahtjevan minimalan otisak zavarenog spoja, odnosno tzv. nevidljivim zavarima na čijoj je površini zavarena točka slabo uočljiva [23]. Na slici 17 shematski su prikazana tri tipa elektroda.



Slika 17. Tri najčešća tipa vrha elektrode [23]

Elektrode za elektrootporno zavarivanje često su konstruirane s kanalom kojim cirkulira hladna voda iz razloga da bi se smanjila radna temperatura same elektrode i povećao njen radni vijek. Na slici 18 prikazani su glavni dijelovi cilindrične ravne elektrode za EO točkasto zavarivanje.



Slika 18. Cilindrična ravna elektroda za EO točkasto zavarivanje [7]

2.7.1. Funkcije elektroda

Elektrode za elektrootporno zavarivanje obavljaju nekoliko funkcija. Najvažnije od njih su prijenos sile do zone zavarivanja uz reguliranje pritiska u zoni prije samog protoka struje. Pritisak ne smije biti ni prevelik, ni premalen. Sljedeća funkcija je da provode električnu struju zavarivanja na mjesto kontakta uz zagrijavanje i stvaranje zavarenog spoja. Elektrode, također reguliraju gustoću struje na mjestu zavarivanja i određuju promjer zavarene jezgre. Na kraju, uz određivanje položaja izratka, odvede toplinu iz zone zavarivanja tokom prolaza struje i poslije isključenja. [7]

2.7.2. Materijali elektroda

Elektrode se najčešće izrađuju od legura bakra, a moraju imati sljedeće karakteristike:

- 1) visoka električna i toplinska provodljivost,
- 2) visoka tvrdoća pri radnoj temperaturi,
- 3) visoka mehanička otpornost,
- 4) homogenost strukture,
- 5) postojana mehanička i električna svojstva.

Prvi zahtjev najbolje ispunjava čisti bakar, ali je njegova tvrdoća, posebno na povišenim temperaturama, nedovoljna. Zato se iz gore spomenutih razloga, za izradu elektroda najčešće koriste legure bakra, a RWMA² ih je podjelio u 3 grupe:

- **Grupa A**, sadrži gotovo čisti bakar, a dijeli se u dva razreda:
 - **Razred 1**: 99% bakar + 1% kadmij čija kombinacija ima provodljivost od 92% i zato se preporučuje za zavarivanje aluminijских i magnezijevih legura, bakra, mjeda i slično.
 - **Razred 2**: 99,2% bakar + 0,8% krom uz provodljivost od 82%. Koristi se kod većine materijala.
- **Grupa B**, sadrži vatrostatne metale [24]. Oni imaju ekstremno visoku točku taljenja, a to su molibden, tantal, wolfram i renij [25].
- **Grupa C**, sadrži posebne materijale kao što su ojačane disperzije bakra [24].

² RWMA = Resistance Welding Manufacturers Association

2.8. Automatizacija i robotizacija zavarivanja

Usprkos tome što se uvođenjem robotizacije gube radna mjesta, ona je nezaobilazna zbog više razloga. Često se može čuti da su roboti uvedeni zbog takozvanih „4D poslova“³. Stalnim zahtjevom za povećanjem produktivnosti, poboljšanjem uvjeta rada zavarivača, povišenjem i ponovljivosti kvalitete, uz sve izraženiji nedostatak kvalitetnih zavarivača, pojavila se potreba za uvođenjem novih sustava zavarivanja. Tu je uz MIG/MAG, TIG, plazma i laser postupke zavarivanja svoje mjesto uvelike pronašlo i elektrootporno zavarivanje koje se počelo robotizirati 60-ih godina 20. stoljeća. 1970. godine, General Motors je uveo prvu proizvodnu liniju s robotiziranim elektrootpornim točkastim zavarivanjem koja se sastojala od 24 robota opsluživanih pokretnom trakom. Danas je ono vrlo raširen postupak robotiziranog zavarivanja, posebice u autoindustriji, gdje postoji i više od 60 robota u jednoj proizvodnoj liniji. Na slici 19 prikazan je tipičan robot za elektrootporno točkasto zavarivanje sa šest stupnjeva slobode gibanja



Slika 19. Robot za elektrootporno točkasto zavarivanje [26]

³ „4D poslovi“ = eng.: difficulty, dangerous, dirty, dull = hrv. teško, opasno, prljavo, zamorno

2.8.1. Programiranje robota [27]

Uvođenje robotiziranog zavarivanja zahtijeva utrošak dodatnih sati prijeko potrebnih za programiranje robota, te vrlo točno pozicioniranje radnih komada za izvođenje zavarivanja. Osnovne metode (vrste) programiranja robota su: on-line, offline i hibridno (mješano) programiranje. Također unutar navedenih osnovnih metoda programiranja postoje daljnje podjele npr.: “teach in” metoda, izravno i indirektno programiranje, programiranje kretanjem po stazi, programiranje postavljanjem na točku, programiranje sa senzorskom podrškom, makroprogramiranje, grafičko programiranje, programiranje orijentirano zadatku, programiranje orijentirano pokretu.

2.8.1.1. On-line metoda programiranja

Programiranje se vrši na radnoj poziciji robota, što znači da za vrijeme samog programiranja robot ne može obavljati proizvodnu funkciju. Najčešće spominjana i upotrebljavana metoda je tzv. “teach in” metoda programiranja (učenje robota) koja se dijeli na izravno i neizravno učenje. Izravno je učenje danas vrlo rijedak način programiranja robota, a izvodi se tako da operater pomiče ruku robota preko željenih točaka u prostoru. Pozicije tih točaka se pohranjuju u memoriju što omogućuje kasnije kretanje robota po stazi definiranoj tim točkama. S druge strane, neizravno učenje je najčešći način programiranja tako da se uobičajeno naziva “teach in” metoda učenja, odnosno naziv on-line metode programiranja se izjednačuje sa “teach in” metodom. Ovom se metodom robota pomiče preko željenih točaka u prostoru uz pomoć kursorskih tipki ili *joysticka* koji je smješten na privjesku za učenje uz sam robot. Uz koordinate navedenih točaka u memoriju se pohranjuju željeni parametri gibanja (linearno, kružno) i parametri zavarivanja. Prednosti on-line metode su da lako uči pa nije potreban visokoobrazovani kadar kao ni nikakva dodatna nabavka softwera i hardwera. Glavni nedostatak ove metode je to da za vrijeme programiranja robot ne može obavljati proizvodnu funkciju, a kad je više robota u pogonu to je vrlo dugotrajna metoda jer svaki robot treba posebno programirati.

2.8.1.2. Off-line programiranje

Za razliku od on-line metode koja se vrši na radnoj poziciji robota, ovom se metodom robot prema zavarivačkim nacrtima unaprijed programira neovisno o radnom mjestu pomoću specijaliziranog softvera na računalu. Tako se dobije virtualna stvarnost kao 3D simulacija robotske stanice, radnog komada, robota i njihovog gibanja. Moguće je prije samog procesa izvršiti simulaciju zavarivanja sa svim radnim uvjetima, kao i provjera na eventualni sudar robota s nečim iz okoline. Robot za vrijeme programiranja može obavljati proizvodnu funkciju što dovodi do veće proizvodnosti. Za provođenje metode potrebna je nabavka vrlo skupih softvera i hardvera. Isto tako, potreban je visokoobrazovani radni kadar osposobljen za ovu kompliciranu vrstu programiranja.

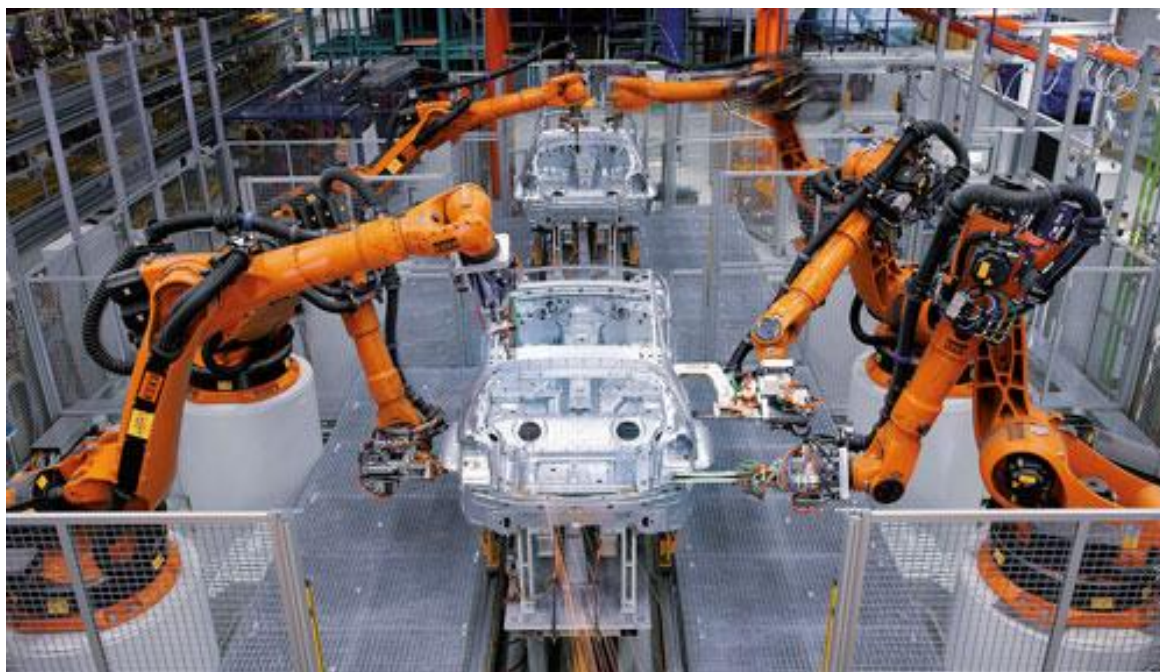
2.8.1.3. Hibridno (mješano) programiranje

Hibridno je programiranje kombinacija on-line i off-line metode sa svrhom da se iskoriste prednosti od svake pojedine, a eliminiraju nedostaci. Ovom metodom potrebno je robota pomoću privjeska za učenje prevesti preko željenih točaka, zapamtiti im pozicije (on-line dio) te nakon toga na računalu koje je ili nije izravno povezano s robotom, uz snimljene pozicije točaka izraditi program za zavarivanje (off-line dio). Takvim načinom programiranja robot je kraće vrijeme izuzet iz proizvodnje nego kod on-line programiranja. Postoji zahtjev za dodatni softwer i hardwer, ali je on puno jeftiniji nego kod off-line programiranja. Vrijeme učenja programiranja je nešto dulje nego kod on-line, ali je puno kraće nego kod off-line programiranja.

2.9. Primjena EO točkastog zavarivanja

Elektrootporno točkasto zavarivanje je zbog svoje brzine zavarivanja, učinkovitosti te pogodnosti za automatizaciju i robotizaciju pronašlo široku primjenu u mnogim granama industrije, posebice tamo gdje se treba zavariti velik broj spojeva. Vrlo je pogodno za masovnu i serijsku proizvodnju. Najviše se primjenjuje u industriji vozila, naročito u automobilskoj, zrakoplovnoj i industriji tračničkih vozila. Točkastog zavarivanja ima i u prehrambenoj industriji te u industriji bijele i ratne tehnike, kao i u nuklearnoj, raketnoj i svemirskoj tehnici.

Na slici 20 prikazan je klasičan primjer robotiziranog točkastog zavarivanja karoserije automobila tako da više robota istovremeno obavlja, svaki svoj, programirani zadatak.



Slika 20. Zavarivanje karoserije automobila [28]

2.10. Zavarljivost metala EO točkastim zavarivanjem [29]

Teoretska i praktična iskustva pokazuju da zavarljivost metala i legura EO točkastim zavarivanjem ovisi o mnoštvu utjecajnih faktora. Višegodišnja istraživanja su pokazala da se ocjena zavarljivosti metala i legura može dati prema tablici 4.

Tablica 4. Ocjena međusobne zavarljivosti metala i legura postupcima EO zavarivanja [29]

1 – odlično 2 – dobro 3 – podnošljivo 4 – loše 5 – nedovoljno 6 – nemoguće	Aluminij	Nerđajući čelik	Mjed	Bakar	Pocinčani čelik	Čelik	Olovo	Nikal	Krom-nikal (20%Cr, 80%Ni)	Cink	Fosforna bronza	Novo srebro
Aluminij	2	5	4	5	3	4	5	4	4	3	3	6
Nerđajući čelik	5	1	5	5	2	1	6	3	3	6	4	4
Mjed	4	5	3	4	4	4	6	3	3	5	3	3
Bakar	5	5	4	5	5	5	5	4	4	5	3	3
Pocinčani lim	3	2	4	5	2	2	4	3	3	3	4	5
Čelik	4	1	4	5	2	1	6	3	3	6	3	4
Olovo	5	6	6	5	4	6	3	5	5	3	5	5
Nikal	4	3	3	4	3	3	5	1	2	6	3	2
Krom-nikal (20%Cr, 80%Ni)	4	3	3	4	3	3	5	2	1	6	4	2
Cink	3	6	5	5	3	6	3	6	6	3	4	6
Fosforna bronza	3	4	3	3	4	3	5	3	4	4	2	2
Novo srebro	6	4	3	3	5	4	5	2	2	6	2	1

Kod zavarivanja čelika s vrlo niskim sadržajem ugljika (0,05% - 0,1%) mehanička svojstva zavara praktično su jednaka mehaničkim svojstvima zavarivanog materijala. S povećanjem sadržaja ugljika iznad 0,1% zapaža se neznatan utjecaj zakaljene strukture što dovodi do povećanja čvrstoće zavara i omogućuje postizanje zavarenih spojeva čija čvrstoća ponekad premašuje čvrstoću osnovnog materijala. Utjecaj zakaljene strukture vrlo brzo se povećava s povećanjem sadržaja ugljika, ali se istodobno zapaža smanjenje plastičnosti zavarenog spoja. Kod zavarivanja čelika sa sadržajem ugljika iznad 35% metalografska ispitivanja pokazuju prisustvo martenzita u jezgri zavarene točke. To dovodi do pojave krhkosti pa ako zavarena točka nije naknadno toplinski obrađena spoj postaje neupotrebljiv. Iz tog se razloga često provodi naknadno zagrijavanje [29].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada propisana je tehnologija elektrootpornog točkastog zavarivanja na limu od visokolegiranog nehrđajućeg čelika te je ustanovljen plan pokusa za kvantifikaciju utjecaja struje zavarivanja, vremena zavarivanja i sile na elektrode. Uz primjenu norme HRN EN ISO 15614-12 načinjene su odgovarajuće ispitne epruvete, a potom je ispitana kvaliteta zavarenog spoja.

3.1. Materijal ispitnih uzoraka i norma

Materijal ispitnih uzoraka je nehrđajući čelik NIROSTA® 1.4541 (EN 10 088-2) debljine 1,25 mm i kemijskog sastava prikazanog u tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav NIROSTA® 1.4541 čelika [30]

	C	Cr	Ni	Si	Mn	Ti
min.	–	17,0	9,0	–	–	$5 \times C < Ti < 0,70$
max.	0,08	19,0	12,0	1,0	2,0	

Ovaj tip čelika najčešće se primjenjuje u kemijskoj, petrokemijskoj, prehrambenoj i nuklearnoj industriji kao i u industriji papira. Pogodan je za izradu prirubnica, ventila, okova, spojki, prstena, brtvi, vijaka, matica, vratila, diskova i slično [31].

Norma EN ISO 15614-12 sadrži niz pravila i propisa za elektrootporno točkasto zavarivanje [32]. U ovome je radu korištena norma EN ISO 14273:2001 za pripremu ispitnih uzoraka podobnih za ispitivanje vlačnom silom na kidalici i norma ISO 14329:2003 za ispitivanje dimenzija zavarenog spoja (promjer točke, promjer zone utjecaja topline).

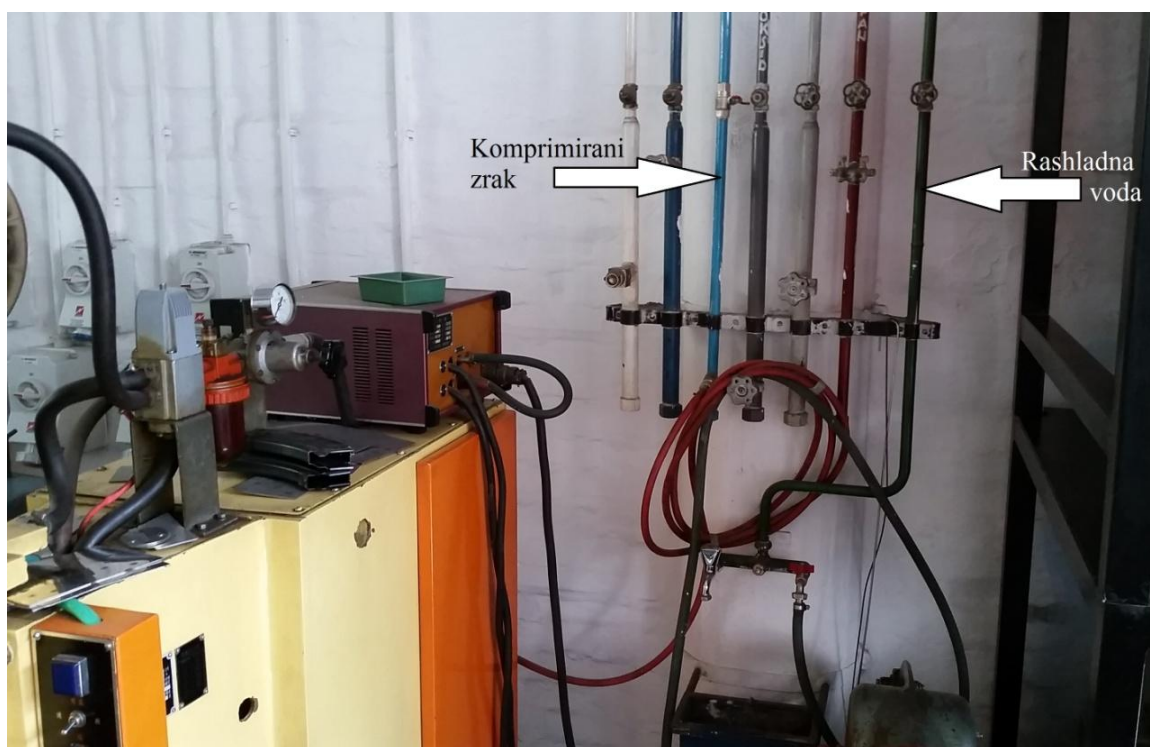
3.2. Opis stroja [33]

Stroj za elektrootporno točkasto zavarivanje na kojem je izveden eksperiment, kineske je proizvodnje, tipa DZ-63, proizvođača „Chengdu Electric Welding Machine Works“. Na Fakultet strojarstva i brodogradnje dopremljen je u lipnju 1989. godine, a proizveden je dvije godine ranije. Sastoji se od: kućišta, okvira, gornje i donje konzole, pneumatskog transmisijskog mehanizma, sekundarnih vodiča, transformatora za zavarivanje, ispravljačkog sklopa, upravljačke kutije, nožne pedale, sustava zraka i rashladnog sustava. Nalazi se u Laboratoriju za zavarivanje, a prikazan je na slici 21.



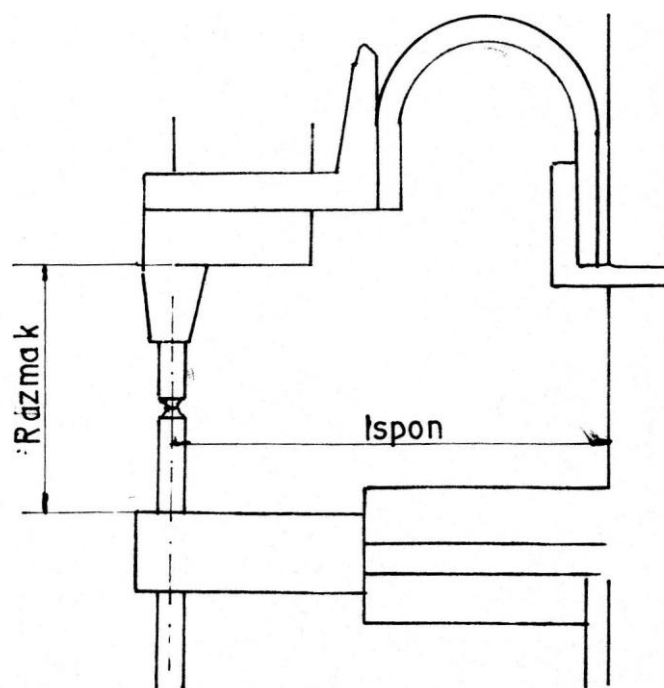
Slika 21. Stroj za EO točkasto zavarivanje na kojem je izveden eksperiment

Nominalna snaga stroja iznosi 63 kVA, a namjenjen je za EO točkasto zavarivanje s monofaznim priključkom na električnu mrežu 380 V (50 Hz) i istosmjernom strujom zavarivanja tako da se izmjenična struja na sekundarnoj strani transformatora pretvara u istosmjernu preko silicijskih dioda. Uz stroj, isporučen je i kontrolni ormarić tipa KD2-250 preko kojeg je stroj priključen na električnu mrežu, a preko cijevi i crijeva na komprimirani zrak i vodovodnu mrežu, što je prikazano slikom 22.



Slika 22. Priključak komprimiranog zraka i rashladne vode s uređajem

Vertikalna konzola koja nosi nosače elektroda je iz debelih limova međusobno zavarenih i strojno obrađenih s prednje strane. Donji i gornji nosač elektrode je zavarene izvedbe s minimumom ljevanih dijelova za provođenje struje zavarivanja. Gornji priključak elektrode, vezan na sekundarni izvod pomoću dilatatora, je iz bakrenih folija. Promjer tijela konične elektrode je 20 mm, a promjer vrha elektrode je 12 mm. Isp⁴ iznosi 500 mm, a razmak između gornjeg nosača elektrode i paralelne plohe donjeg nosača elektrode je 295 mm, što je shematski prikazano na slici 23.



Slika 23. Shematski prikaz ispona i razmaka

Bočne stranice zatvorene su vratima po cijeloj visini stroja, što omogućuje dobar pristup unutarnjim elementima (transformator, ispravljač, priključna ploča). Vrata se zatvaraju jednostavnom bravom bez ključeva što ponekada može predstavljati problem iz razloga sigurnosti (preferira se da svi elementi koji su pod visokim naponom budu pod ključem i nedostupni nekvalificiranim osobama).

Priključna ploča je vrlo jednostavne izvedbe. Oznake priključaka i vodiča su na papirićima smotanim oko kablova neposredno uz mjesto priključenja na pločici. Sa zadnje vanjske strane je priključak vode i zraka te sabirnica vode. Postoje četiri zasebna sustava hlađenja: krug za hlađenje transformatora, krug za hlađenje diodnog ispravljača, krug za hlađenje gornje elektrode te krug za hlađenje donje elektrode.

⁴ Isp = udaljenost kučišta od osi elektroda

Sa stražnje strane stroja je i filter za vodu (uobičajen kod korištenja komprimiranog zraka iz centralnih sustava kod kojih se često javlja kondenzacija vode). Na gornjoj strani stroja, slika 24, postavljeni su manometar u *MPa* i nauljivač zraka, te elektromagnetski razvodnik za upuštanje i ispuštanje zraka iz cilindra.



Slika 24. Manometar, nauljivač i elektromagnetski razvodnik

Zbog spriječavanja zaostajanja vode u sustavu za hlađenje tijekom duljih prekida u zimskom periodu te posljedica koje mogu nastati zaleđivanjem vode u sustavu (lom tiristora, transformatora i slično), na rashladni je sistem spojen i zrak tako da se nakon prestanka rada ispuše voda iz sustava. Napomena: potrebno je poštivati pravilo da se kod prekida rada prvo zatvara dovod vode, a onda dovod zraka, dok se kod puštanja u pogon prvo propušta zrak, a potom voda.

Na prednjoj strani kontrolnog ormarića KD2-250, slika 25, ugrađeni su svi potrebni elementi za regulaciju vremena i struje zavarivanja pomoću potenciometra..

Prekidača su tri:

- prvi za ukapčanje i iskapčanje programatora,
- drugi za pojedinačni ili automatski rad i
- treći za rad sa ili bez struje zavarivanja (kod podešavanja vrhova elektroda ili slično kada je potrebno probati bez struje zavarivanja).



Slika 25. Kontrolni ormarić tipa KD2-250

Iznad kodiranih sklopnika prikazan je shematiziran ciklus zavarivanja i postavljene su signalne LED diode s indikacijom pojedinog vremena. Blizu vrha kontrolnog ormarića nalaze se dvije žarulje koje označuju uključenost uređaja i signalizaciju eventualnog pregrijavanja.

Na kontrolnom ormariću podešavaju se 4 karakteristična vremena:

t_{pp} = vrijeme pretpritiska – vrijeme od uljučenja cilindra do početka protjecanja struje,

t_z = vrijeme zavarivanja – vrijeme prolaza struje zavarivanja,

t_d = vrijeme držanja – vrijeme nakon isključenja struje zavarivanja sve do prestanka djelovanja sila na elektrode,

t_s = vrijeme stanke – vrijeme između kraja jednog i početka drugog ciklusa u automatskom radu).

Upotrebljeni su kodirani sklopnici, svi s mogućnošću podešavanja vremena od 1 do 99 perioda (0,02 do 1,98 sekundi) s podjelama po jedna perioda (1 per = 0,02 s).

Ovaj se stroj može upotrijebiti za zavarivanje konstrukcijskih čelika, čelika s prevlakom, nehrđajućih čelika, temperaturno otpornih legura, aluminija i njegovih legura, ali i za zavarivanje rijetkih metala kao što su titan, niobij, cirkonij, konij, tantal i sl. Osobito je prilagodljiv za sljedeće industrije: aeronautika, avijacija, nuklearna tehnika, radio industrija. DZ-63 može se uspješno upotrijebiti i za zavarivanje više čeličnih limova (4 pa i više).

3.3. Tijek eksperimenta

U sljedećim je odlomcima detaljno opisan tijek eksperimenta po svim koracima.

3.3.1. Priprema ispitnih uzoraka

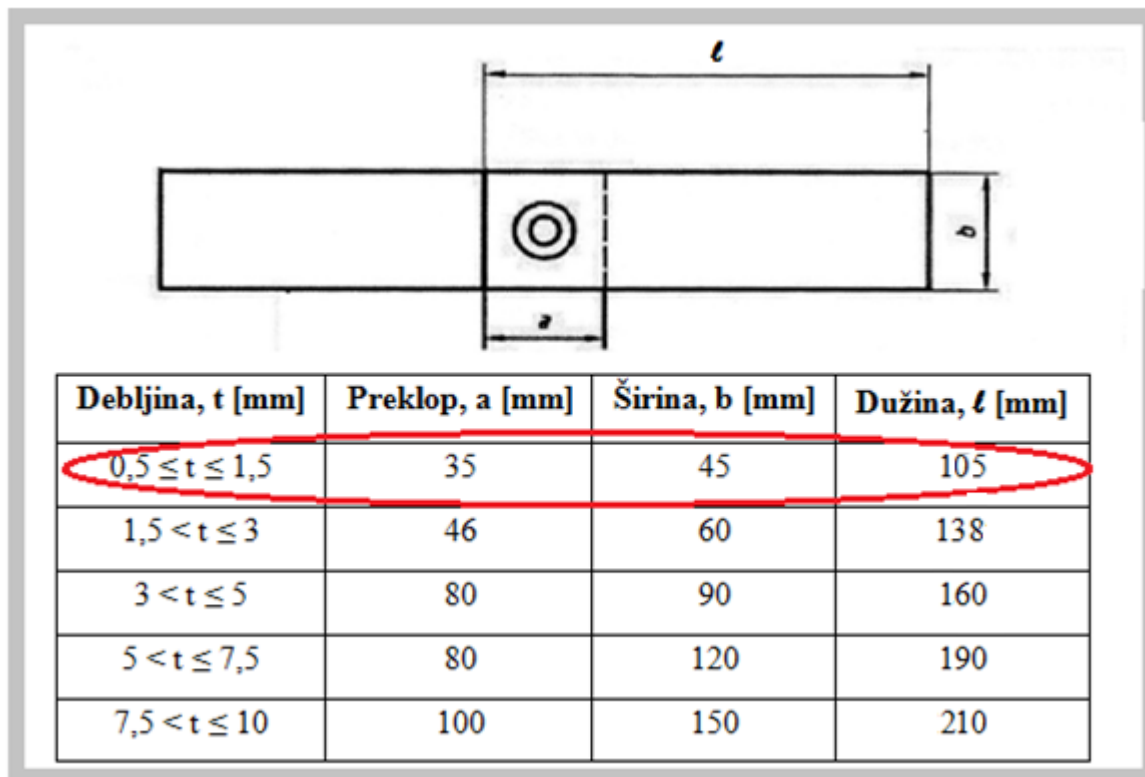
Uzorci su pripremljeni kako to propisuje norma EN ISO 14273:2001. Limovi debljine 1,25 mm, dužine 250 mm i širine 105 mm, prikazani na slici 26, razrezani su na propisane dimenzije te očišćeni alkoholom.



Slika 26. Limovi prije rezanja

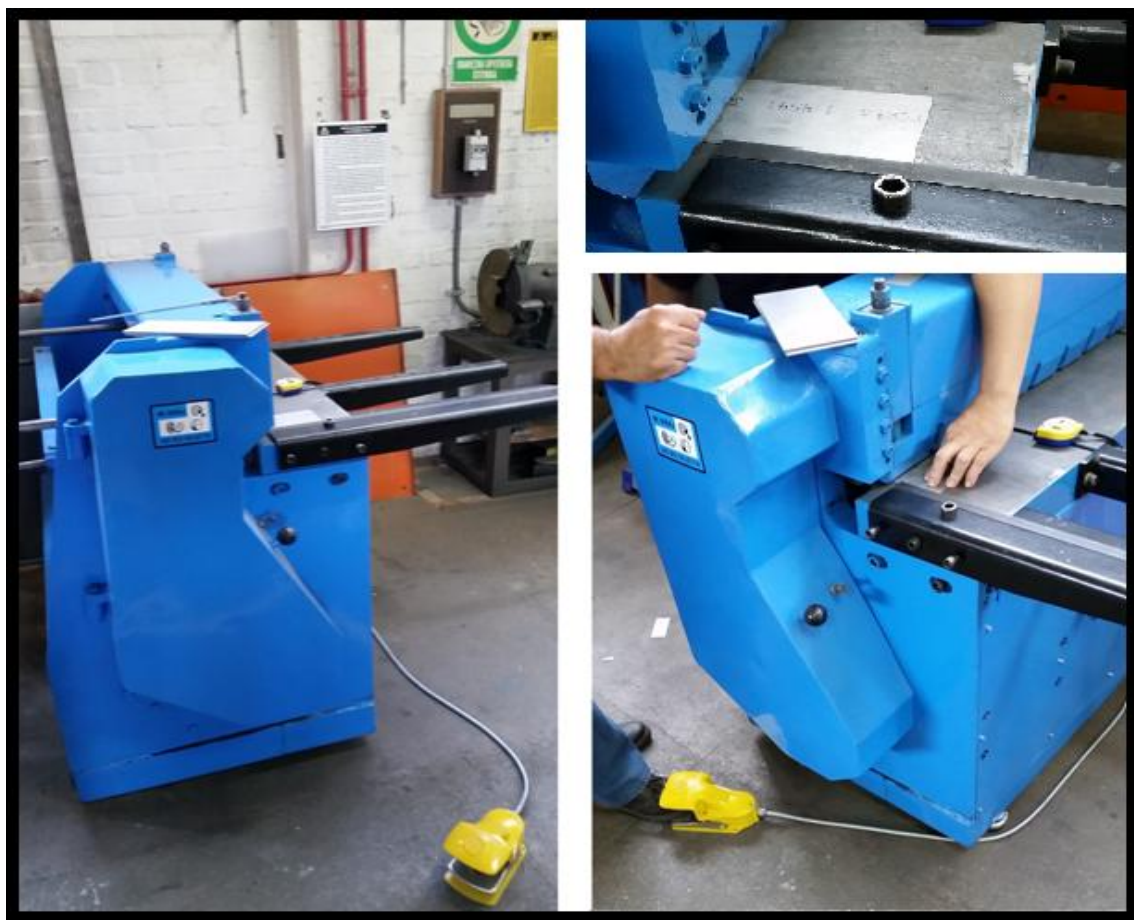
Za debljinu lima 1,25 mm, prema normi EN ISO 14273:2001, slika 27, ispitni se uzorci izrezuju na dimenzije čije su vrijednosti sljedeće:

- širina uzorka, $b = 45 \text{ mm}$
- dužina uzorka, $\ell = 105 \text{ mm}$



Slika 27. Propisane dimenzije za ispitne uzorke [34]

Za rezanje limova korištene su strojne škare, slika 28, u Laboratoriju za alatne strojeve, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Izgled uzoraka, s ucrtanom mjerom za preklap, prikazan je na slici 29.



Slika 28. Rezanje ispitnih uzoraka na strojnim škarama



Slika 29. Ispitni uzorci nakon rezanja

3.3.2. Određivanje parametara zavarivanja

Prije samog postupka zavarivanja na stroju je potrebno podesiti parametre zavarivanja. U ovom su eksperimentu kombinirana tri parametra, a to su:

- vrijeme zavarivanja (t_z),
- struja zavarivanja (I_z) i
- sila pritiska elektroda (F_e).

3.3.2.1. Vrijeme zavarivanja

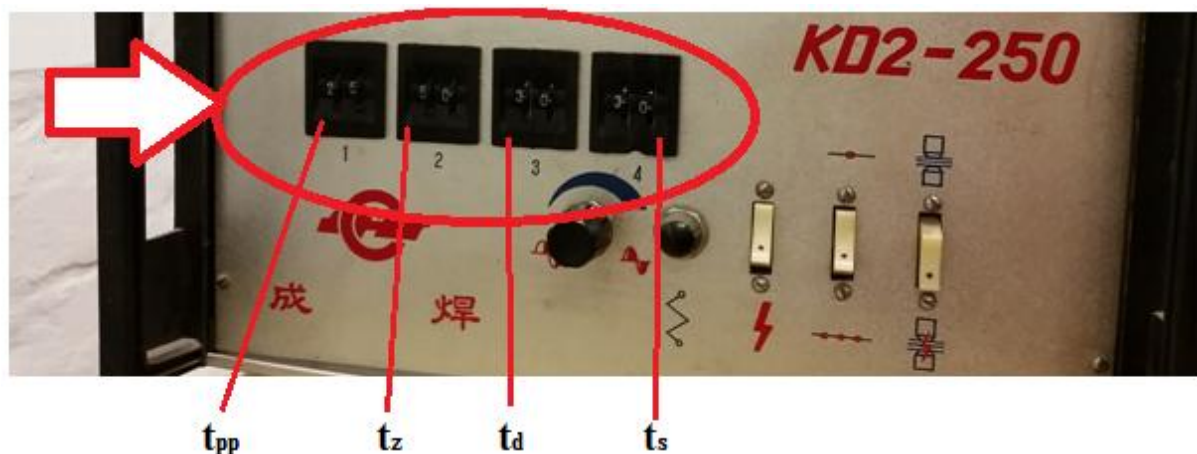
U eksperimentu su kombinirana dva vremena označena s " t_A ", i " t_B ".

Vrijeme t_A iznosi 55 perioda (1,1 sekunda), a vrijeme t_B iznosi 99 perioda (1,98 sekundi).

Ostale tri komponente vremena bile su nepromijenjene tijekom cijelog eksperimenta, a njihov iznos je:

- $t_{pp} = 35$ per (0,7 sekundi) - vrijeme pretpritiska,
- $t_d = 40$ per (0,8 sekundi) - vrijeme držanja,
- $t_s = 30$ per (0,6 sekundi) - vrijeme stanke.

Navedena vremena namještaju se na kontrolnom ormariću, slika 30, tako da broj 1 označava vrijeme pretpritiska, broj 2 vrijeme zavarivanja (vrijeme tečenja električne struje), broj 3 vrijeme držanja (kad ne teče električna struja) i broj 4 vrijeme stanke između dva ciklusa.



Slika 30. Reguliranje vremena

3.3.2.2. Jakost struje zavarivanja

Kombinirane su dvije jakosti struje zavarivanja označene s „ I_A “ i „ I_B “.

Struja I_A iznosi 5,92 kA (60% od maksimalne vrijednosti jakosti struje na stroju), a struja I_B 9,86 kA (maksimalna jakost struje na stroju). Jakost struje se regulira pomoću potenciometra smještenog na kontrolnom ormariću prikazanog slikom 31.

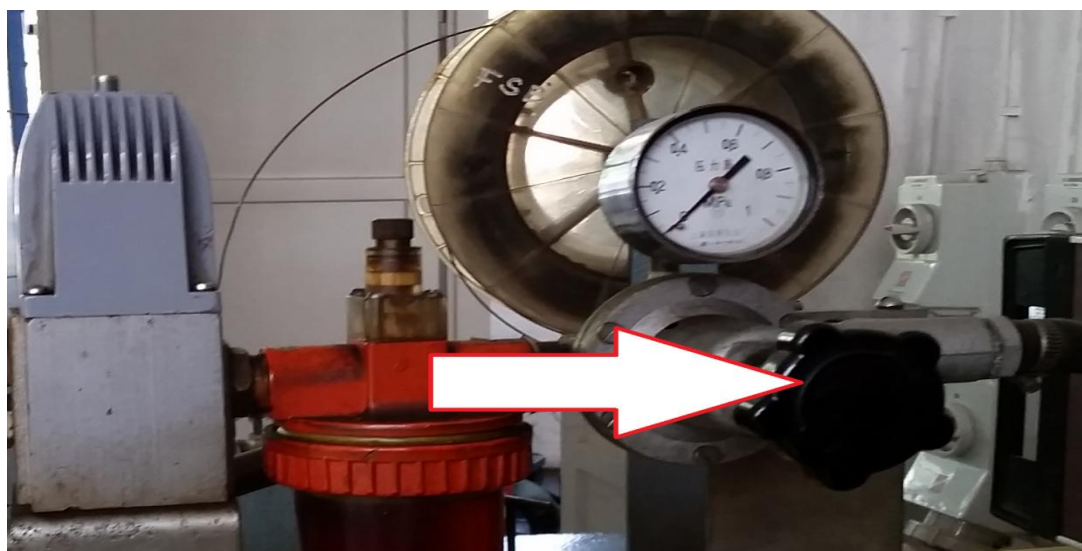


Slika 31. Reguliranje jakosti struje zavarivanja

3.3.2.3. Sila pritiska elektroda

Kombinirane su dvije sile pritiska označene s „ F_{eA} “ i „ F_{eB} “.

Sila F_{eA} iznosi 3,4 kN što odgovara tlaku od 0,2 MPa, a sila F_{eB} iznosi 6,8 kN što odgovara 0,4 MPa. Sile, odnosno pritisak se regulira pomoću ventila, slika 32, iznad kojeg je manometar s brojevnom skalom u MPa.



Slika 32. Reguliranje pritiska između elektroda

3.3.3. Parametri za svaki pojedini uzorak

Eksperiment je proveden na 8 ispitnih uzoraka (16 limova), a iznos parametara koji su mijenjani prikazan je u tablici 6. Iz tablice je vidljivo da su za uzorak broj 1 sva tri mijenjana parametra niže vrijednosti, a za uzorak broj 5 više vrijednosti.

Tablica 6. Iznos parametara zavarivanja

Uzorak br.	Vrijeme zavarivanja t_z [s]	Jakost struje I_z [kA]	Sila ne elektrode F_e [kN]
1	1,1	5,92	3,4
2	1,1	9,86	6,8
3	1,1	5,92	6,8
4	1,1	9,86	3,4
5	1,98	9,86	6,8
6	1,98	5,92	3,4
7	1,98	5,92	6,8
8	1,98	9,86	3,4

3.3.4. Izgled zavarenih uzoraka

Na slikama 33.a i 33.b prikazani su zavareni limovi. Slika 33.a poslikana je tako da je s gornje strane vidljiva točka zavora u dodiru radnog komada i gornje elektrode (lice), a slika 33.b prikazuje točku zavora u dodiru donje elektrode i radnog komada (naličje).



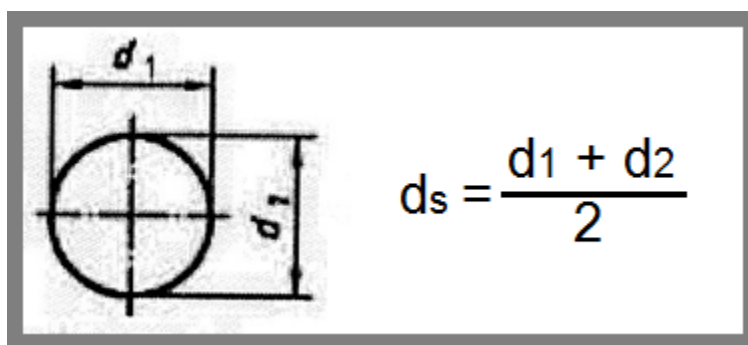
Slika 33.a Lice zavarene točke (kontakt: radni komad – gornja elektroda)



Slika 33.b Naličje zavarene točke (kontakt: radni komad – donja elektroda)

3.3.5. Vizualna analiza uzoraka

Zavareni spojevi su izmjerni pomoću *ImageJ* računalnog programa. Promjeri točke zavora, kao i promjeri zone utjecaja topline izmjereni su po pravilima koje propisuje norma ISO 14329:2003.. Na slici 34 kvalitativno je kotirano kako su izmjereni promjeri točaka na svakom pojedinom uzorku, kao i promjeri zone utjecaja topline. Zbrajanjem dvaju promjera i njihovim dijeljenjem na pola, dobivena je aritmetička sredina (srednja vrijednost) označena s d_s za promjer zavarene točke, a d_{ZUT_S} za promjer zone utjecaja topline. Sve vrijednosti prikazane su u tablici 7.



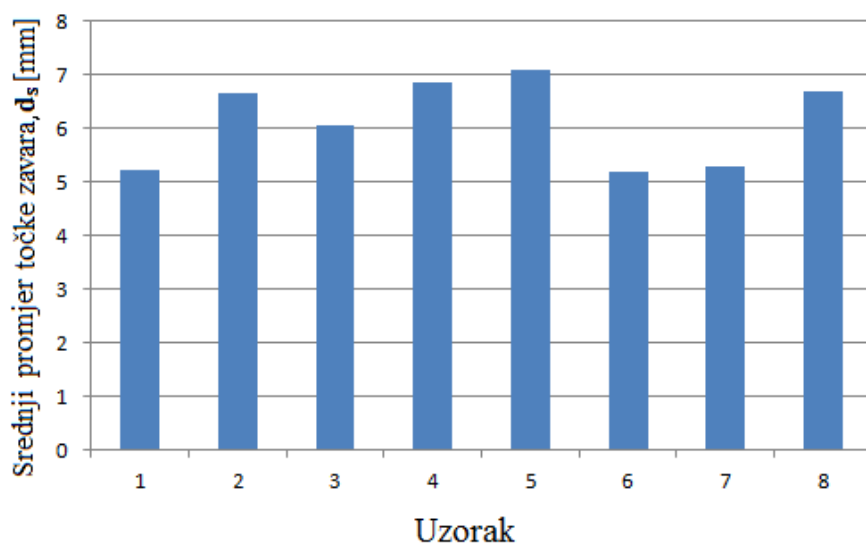
Slika 34. Promjeri i srednja vrijednost promjera [35]

Tablica 7. Promjeri točke zavora i zone utjecaja topline

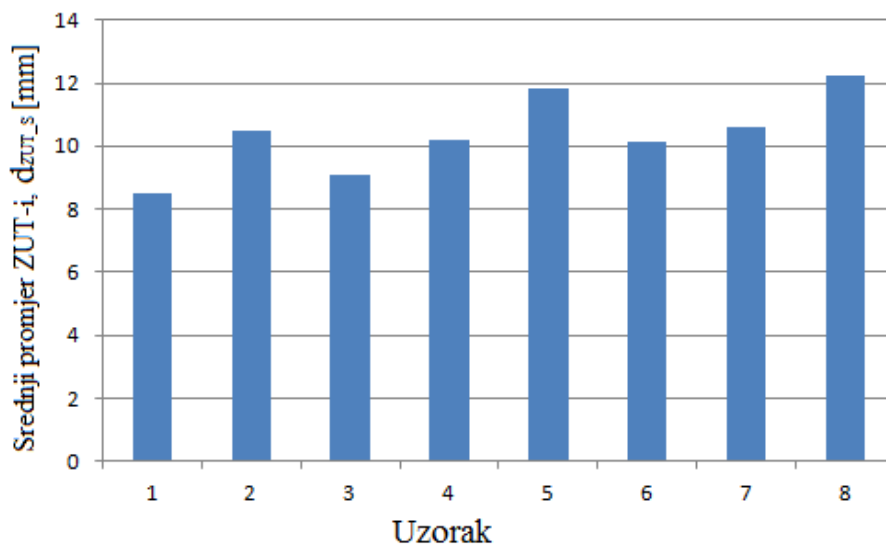
Uzorak	d_1	d_2	d_s	d_{ZUT_1}	d_{ZUT_2}	d_{ZUT_S}
1	5,304	5,138	5,221	8,564	8,399	8,482
2	6,799	6,536	6,668	10,384	10,576	10,480
3	5,971	6,155	6,063	9,027	9,165	9,096
4	6,902	6,828	6,865	10,211	10,209	10,210
5	7,061	7,134	7,098	11,550	12,144	11,847
6	5,237	5,168	5,203	10,202	10,081	10,142
7	5,306	5,308	5,307	10,552	10,623	10,588
8	6,251	7,154	6,703	11,116	13,363	12,240

Napomena: sve vrijednosti promjera su u milimetrima [mm].

Analiziranjem podataka iz tablice 6 u kojoj su navedeni iznosi parametara i tablice 7 u kojoj su navedeni promjeri dolazi se do zaključka da jakost struje zavarivanja ima najveći utjecaj na veličinu točke zavara odnosno zone utjecaja topline, dok vrijeme zavarivanja ima najveći utjecaj na veličinu promjera ZUT-i. Jakost struje zavarivanja kod uzoraka 2, 4, 5 i 8 bila je za 40% viša nego kod ostalih uzoraka, a upravo ovi uzorci 2, 4, 5 i 8 imaju veće promjere od ostalih uzoraka koji su zavareni strujom manje jakosti. Uzorci 5 – 8 imali su duže vrijeme zavarivanja od uzoraka 1 – 4, što ukazuje na to da je vrijeme zavarivanja u korelaciji s promjerom ZUT-a. Grafikon svih srednjih promjera točke zavara prikazan je na slici 35.a. Na slici 35.b. prikazan je grafikon srednjih promjera ZUT-a.



Slika 35.a Prikaz srednjeg promjera točke zavara



Slika 35.b Prikaz srednjih promjera ZUT-a

3.3.6. Ispitivanje uzoraka na kidalici

U Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, vlačnim rastezanjem na kidalici EU40MOD, prikazanoj na slici 36, testirani su svi uzorci. Stroj se sastoji od uređaja za nametanje opterećenja, uređaja za mjerenje sile, uređaja za mjerenje deformacije ispitnog uzorka i uređaja za ispis dijagrama ispitivanja. Dijagrami ispitivanja za svaki uzorak priloženi su na kraju ovog završnog rada.



Slika 36. Kidalica EU40MOD

3.3.6.1. Tijek ispitivanja na kidalici

Svaki od uzoraka čvrsto je stegnut u čeljusti kidalice, slika 37, nakon čega se pomoću računalnog programa prati maksimalna sila, odnosno vlačna čvrstoća za svaki uzorak. Računalni program iscrtava dijagram iz kojeg se mogu očitati traženi podaci.



Slika 37. Ispitivanje čvrstoće zavora

Na slici 38 prikazan je uzorak stegnut u čeljusti kidalice neposredno prije loma tj. kada se dva lima potpuno razdvoje uslijed vlačne sile.



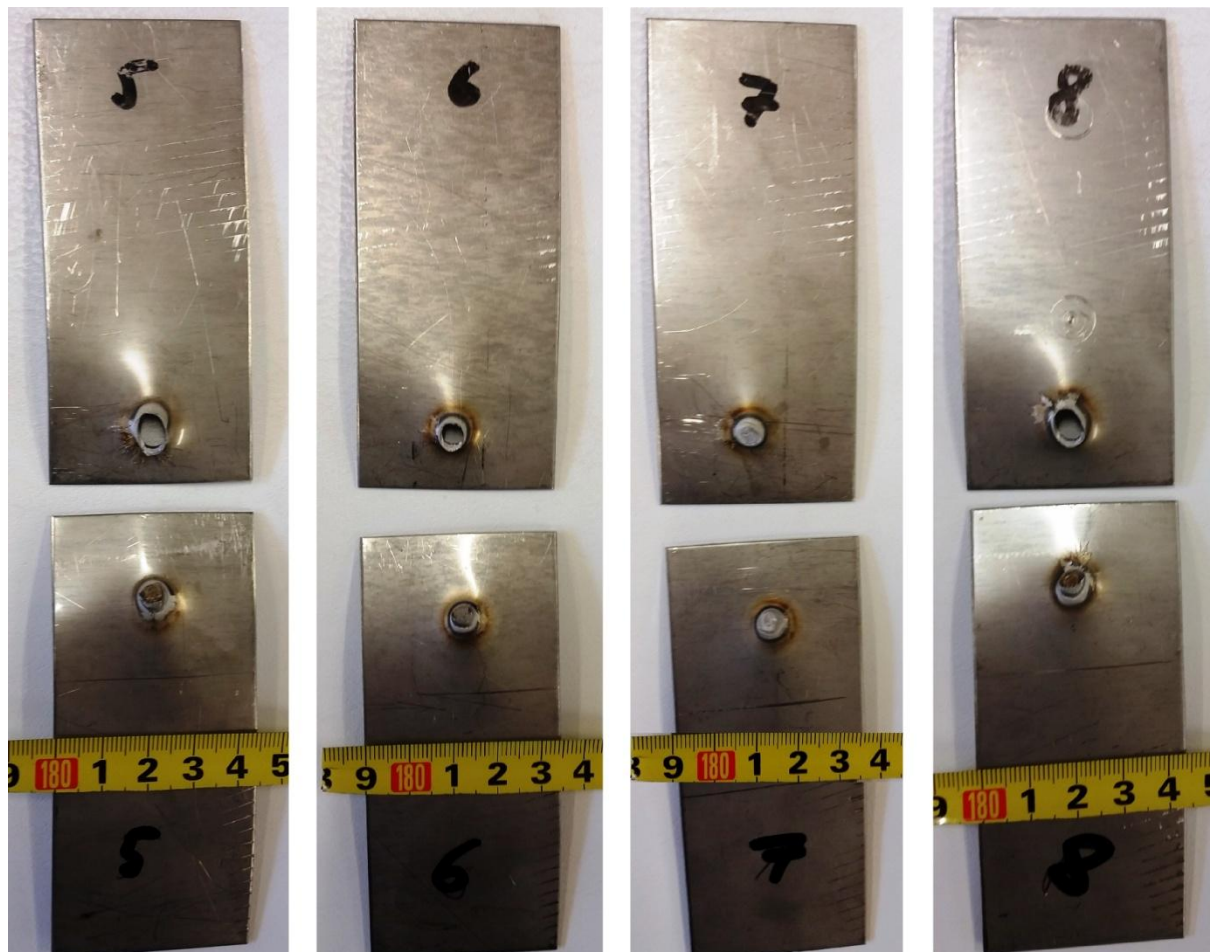
Slika 38. Ispitni uzorak neposredno prije loma

3.3.6.2. Izgled ispitnih uzoraka nakon ispitivanja na kidalici

Slika 39 prikazuje ispitne uzorke 1-4, a slika 40 uzorke 5-8, nakon ispitivanja na kidalici, odnosno nakon razdvajanja limova.



Slika 39. Uzorci 1-4 nakon ispitivanja na kidalici



Slika 40. Uzorci 5-8 nakon ispitivanja na kidalici

Iz slika 39 i 40 je vidljivo da uzorak broj 2 ima najveće oštećenje nakon destrukcije, a ujedno je taj uzorak i najizdržljiviji jer je podnio najveću vlačnu silu, što se može vidjeti u odlomku 3.3.6.3, tablica 8.

3.3.6.3. Rezultati ispitivanja na kidalici

U tablici 8 zapisane su vrijednosti maksimalnih vlačnih sila (F_M) za sve uzorke. Maksimalna vlačna sila je krajnja sila koju ispitni uzorak može izdržati, a da ne dođe do loma.

Tablica 8. Rezultati maksimalnih vlačnih sila

Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8
F_M [kN]	9,368	12,620	9,442	10,784	11,819	9,715	10,363	11,527

Na temelju podataka o vlačnoj sili i promjeru svakog pojedinog uzorka može se izračunati vlačna čvrstoća (R_m) koja je omjer sile (F_M) i ploštine (A) okomite na smjer djelovanja sile.

$$R_m = \frac{F_M}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

Ploština za kružni prejek računa se prema izrazu:

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (4)$$

pri čemu je:

- d = srednji promjer točke dodira između dva zavarena lima [mm],
- $\pi \approx 3,14159$.

3.3.6.4. Srednji promjeri točaka dodira između dva zavarena lima

Srednji promjeri točaka dodira između dva zavarena lima, tj. ispupčenja na limovima nakon ispitivanja na kidalici, izmjereni su u računalnom programu *ImageJ*, a vrijednosti su prikazane u tablici 9. Kao i kod mjerenja promjera točke zavora prije ispitivanja na kidalici u odlomku 3.3.5., ovdje su također izračunate srednje vrijednosti promjera za svaki ispitni uzorak. d_I predstavlja „promjer“ po osi X, a d_{II} po osi Y, dok je d njihova aritmetička sredina

Tablica 9. Promjeri ispupčenja

Uzorak	d_I	d_{II}	d
1	5,184	4,963	5,074
2	5,021	5,123	5,074
3	4,376	4,688	4,532
4	4,900	4,835	4,868
5	5,204	4,899	5,052
6	4,722	4,791	4,757
7	4,296	4,930	4,613
8	4,704	4,699	4,702

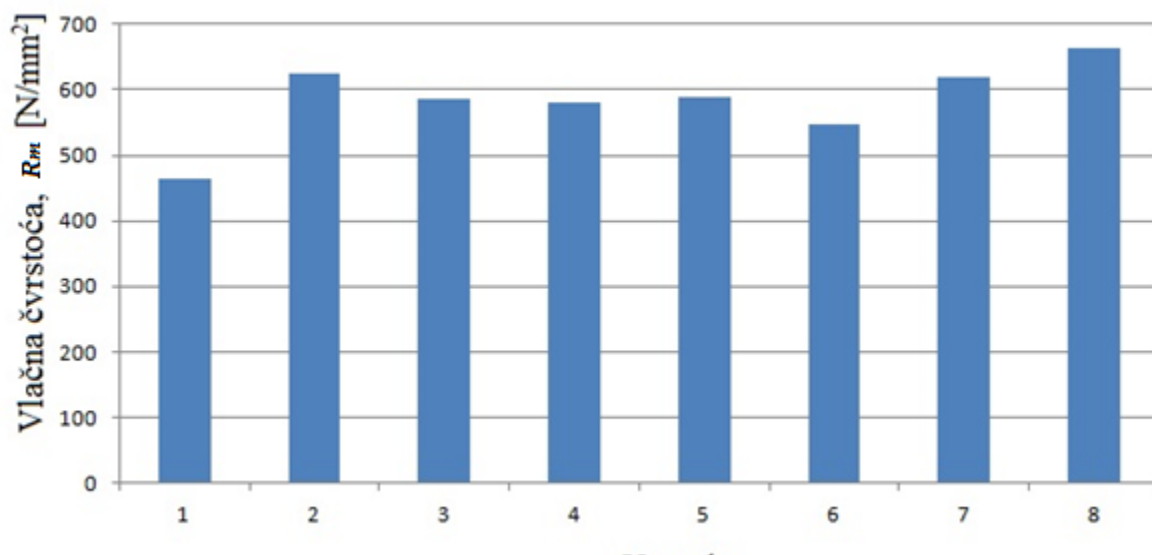
3.3.6.5. Vlačna čvrstoća uzoraka

Uvrštavanjem sile F iz tablice 8 i srednjeg promjera ispupčenja iz tablice 9 u jednadžbe (3) i (4) dobije se vlačna čvrstoća (R_m) pojedinog uzorka, što je prikazano u tablici 10.

Tablica 10. Vlačna čvrstoća ispitnih uzoraka

Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8
R_m [N/mm ²]	463,3	624,6	585,3	579,4	589,6	546,6	620,1	663,8

Zbog bolje preglednosti prikaza, na slici 41 dan je grafikon s vlačnim čvrstoćama za svaki uzorak. Kao što se vidi iz grafikona, uzorak 8 ima najvišu vlačnu čvrstoću, dok uzorak 1 ima najnižu.



Slika 41. Prikaz vlačnih čvrstoća

Uzorci koji imaju vlačnu čvrstoću iznad 600 N/mm² su 2, 7 i 8, zavareni sa većom jakošću struje (9,86 kA), što ukazuje da je struja zavarivanja u ovom eksperimentu imala najveći utjecaj na kvalitetu, odnosno izdržljivost zavarenog spoja, dok su ostali parametri bili manje utjecajni.

4. ZAKLJUČAK

Elektrootporno točkasto zavarivanje jedan je od najbolje automatiziranih i robotiziranih postupaka zavarivanja te je vrlo pogodno za masovnu proizvodnju zbog svoje brzine zavarivanja i učinkovitosti. Zavareni spoj nastaje djelovanjem sile pritiska između elektroda. Električnim otporom stvara se toplina koja se koristi za zagrijavanje određene količine materijala na temperaturu zavarivanja, kao i za zagrijavanje materijala u okolnoj zoni. Najčešće se koristi izmjenična struja niskog napona i visoke jakosti te kratkog trajanja.

Tri osnovna parametra koja utječu na kvalitetu zavarenog spoja su jačina struje zavarivanja, sila pritiska na elektrode i vrijeme zavarivanja. Ovi parametri moraju biti vrlo precizno kvantificirani da bi kvaliteta spoja bila što bolja. Promjenom bilo kojeg od parametara dobije se drugačija geometrija zavarene točke, a time i mehanička svojstva zavarenog komada.

EO točkasto zavarivanje najviše se primjenjuje u industriji vozila, naročito u automobilskoj, zrakoplovnoj i industriji tračničkih vozila.

U eksperimentu se dolazi do zaključka da je za ispitivani visokolegirani nehrđajući čelik jakost struje zavarivanja najviše utjecala na svojstva zavora. Na sva 4 uzorka koja su zavarena većom strujom dobivena su bolja mehanička svojstva. Ne treba se strogo držati jakosti struje i povećavati je bez razloga misleći da je ona najvažniji parametar u svakoj situaciji i u bilo kojem radnom uvjetu ili za bilo koji materijal. Da bi se ostvario kvalitetan zavar potrebno je voditi računa i o vremenu zavarivanja koje i jest najčešća upravljiva varijabla, pošto je jačina struje često ekonomski nepraktična za kontrolu, ali i nepredvidiva. Što se tiče sile pritiska važno je osigurati dovoljnu silu pritiska, jer će se u suprotnom pojaviti nepoželjna pojava, tzv. istiskivanje koje s uočava na početku procesa pri relativno brzom zagrijavanju i nedovoljnoj sili pritiska, ali i na kraju procesa uslijed prekomjernog zagrijavanja.

Sve u svemu, elektrootporno je zavarivanje već dugi niz godina jedna od vodećih tehnologija u spajanju tankih limova, a vjerojatno će tako ostati i u budućnosti.

LITERATURA

- [1] <http://www.welding.com/articles/waarticle19.asp> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [2] <http://www.ram-rijeka.com/Repository/Dokumenti/Osnovni-postupci-zavarivanja.pdf> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [3] <http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [4] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [5] <http://www.maneyonline.com/doi/pdfplus/10.1179/1362171813Y.0000000120> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [6] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [7] Doc.dr.sc. I. Garašić: Prezentacija elektrootporno zavarivanje; ZiM, PS, PZ, URL: https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1416340010-0-elektrootpornozavarivanje.pdf (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [8] <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELOTP.pdf> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [9] http://www.robot-welding.com/spot_welding.htm (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [10] <http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture11&12.htm> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [11] <http://www.ruukki.com/~media/Files/Steel-products/Cold-rolled-metal-colour-coated-instructions/Ruukki-Resistance-welding-manual.pdf> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [12] http://www.robot-welding.com/Welding_parameters.htm#Electrode_Force (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [13] <http://www.amadamiyachi.com/glossary/glossspotwelding> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [14] http://www.motorauthority.com/news/1079397_new-welding-technique-should-lead-to-more-aluminum-in-gm-cars (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [15] <https://www.scribd.com/doc/39612919/Zavarivanje-i-Termicka-Obrada> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [16] <http://gemcowelding.tradeindia.com/spot-welding-machine-390475.html> (dostupno: kolovoz, 2015.)

- [17] http://www.weldingandwelder.com/index.php/spot-welding-equipment-spot-welding-machines-c-206_74_83 (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [18] <http://www.spotweldingconsultants.com/unitrol-softtouch.html> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [19] <http://web-trgovina.metal-kovis.hr/artikl.asp?item=ure%C4%91aj-za-to%C4%8Dkasto-zavarivanje-tecna-4645&code=S-2299&cat=uredaji-za-zavarivanje> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [20] http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/spot-welding-electrode-119595-6526287.jpg (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [21] <http://www.castlemetalseurope.com/blog/ferrous-nonferrous-metals-uses/> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [22] <http://www.engineershandbook.com/Materials/nonferrous.htm> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [23] <http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture11&12.htm> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [24] <http://www.weldguru.com/resistance-weld.html> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [25] <http://www.steelforge.com/literature/ferrousnon-ferrous-materials-textbook/non-ferrous-metals/refractory-metals/> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [26] <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2014/01/compact-robots-optimized-for-spot-welding-applications/> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [27] Prof.dr.sc. Zoran Kožuh: Podloge za robotizirano zavarivanje;
URL: https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1397809652-0-robotiziranozavarivanjeiprevlacenje_podloge4.pdf (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [28] <https://www.oelcheck.de/en/knowledge-from-a-z/lubricants-on-duty/industrie/kuka-all-that-moves-in-automation.html> (dostupno: kolovoz, 2015.)
- [29] Zdenko Kordić: Elektrootporno zavarivanje, Zagreb, 1987.
- [30] http://www.thyssenkrupp.ch/documents/rsh_bl_4541.pdf (dostupno: rujan, 2015.)
- [31] <http://smt.sandvik.com/en/materials-center/material-datasheets/billets/sanmac-4541/> (dostupno: rujan, 2015.)

[32] DIN EN ISO 15614-12 - Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe, Berlin

[33] Milorad Gordić: Izvještaj o ispitivanju stroja za elektrootporno točkasto zavarivanje istosmjernom strujom DZ-63, Zagreb, 1989.

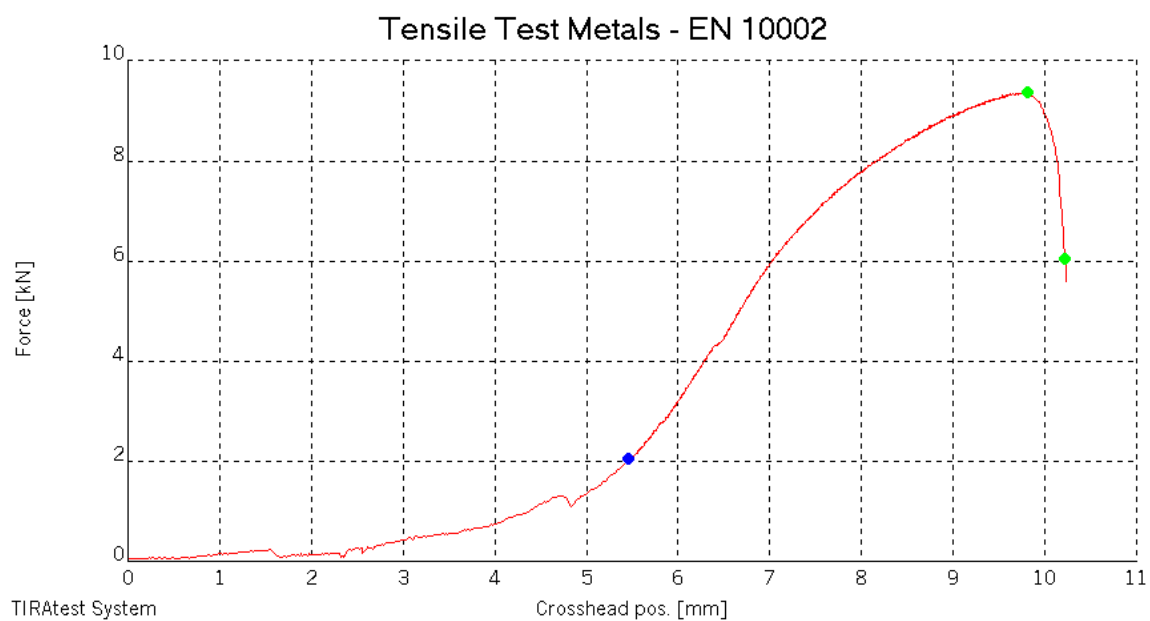
[34] EN ISO 14273:2001 – Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spote, seam and emossed projection welds

[35] ISO 14329:2003 – Resistance welding – Destructive tests of welds – Failure types and geometric measurements for resistance spot, seam and projection welding, Geneva

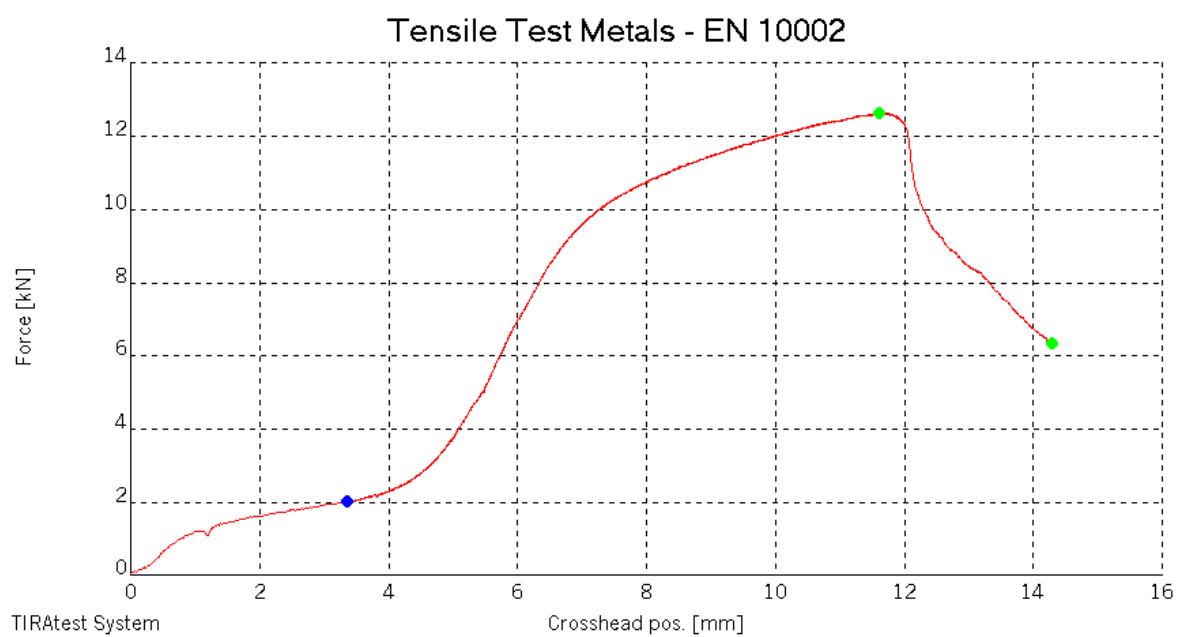
PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Dijagrami vlačnih sila i produljenja za svaki ispitni uzorak snimljeni nakon ispitivanja na kidalici EU40MOD

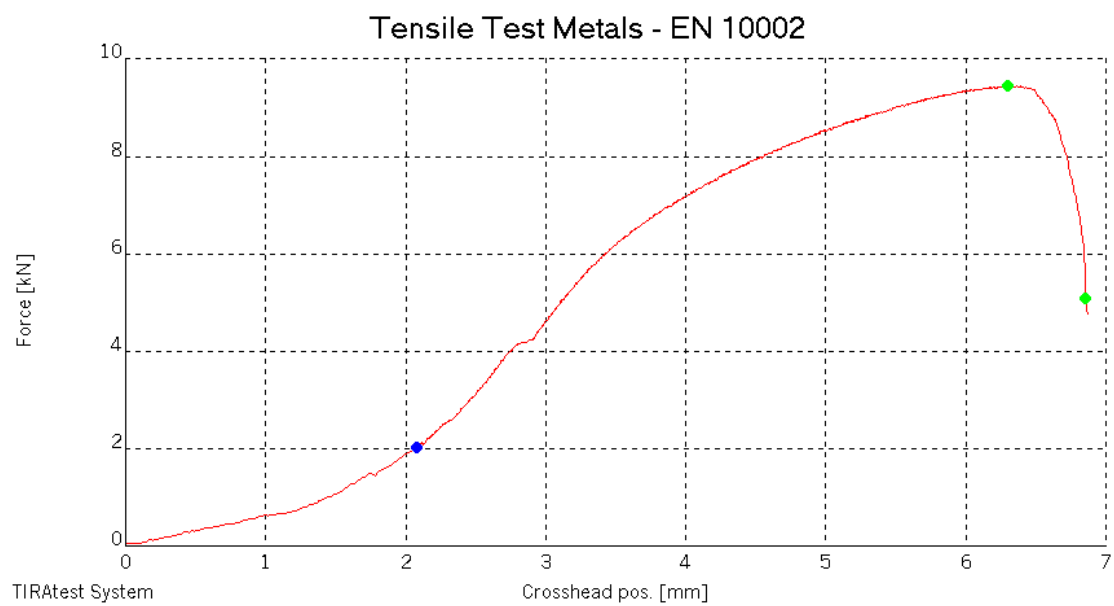
1



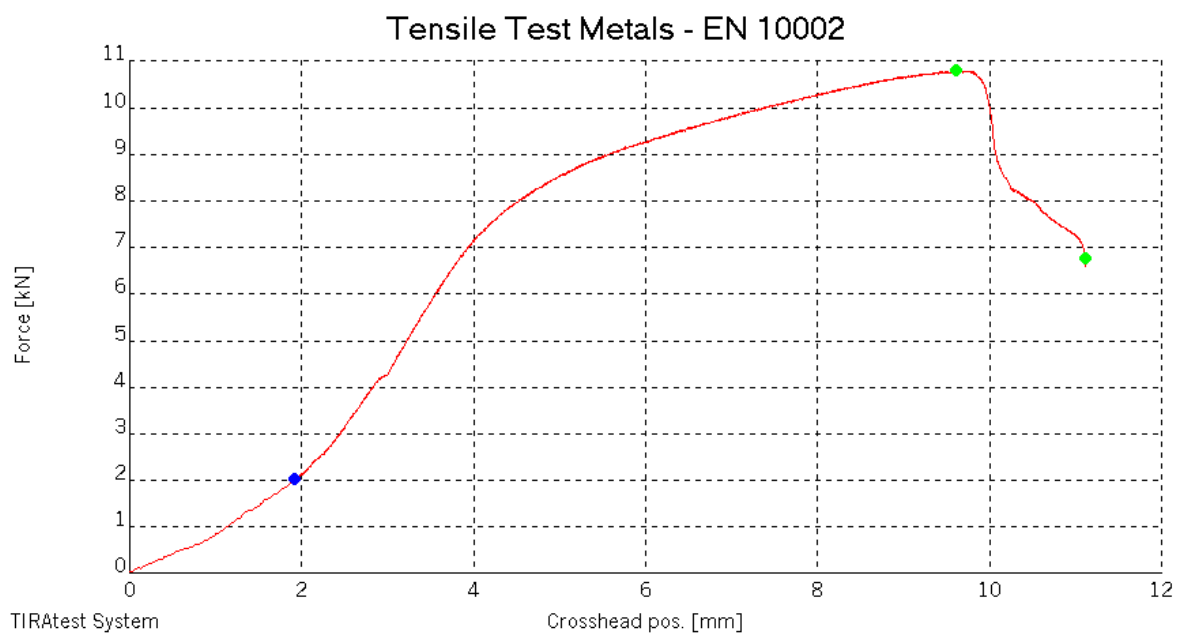
2



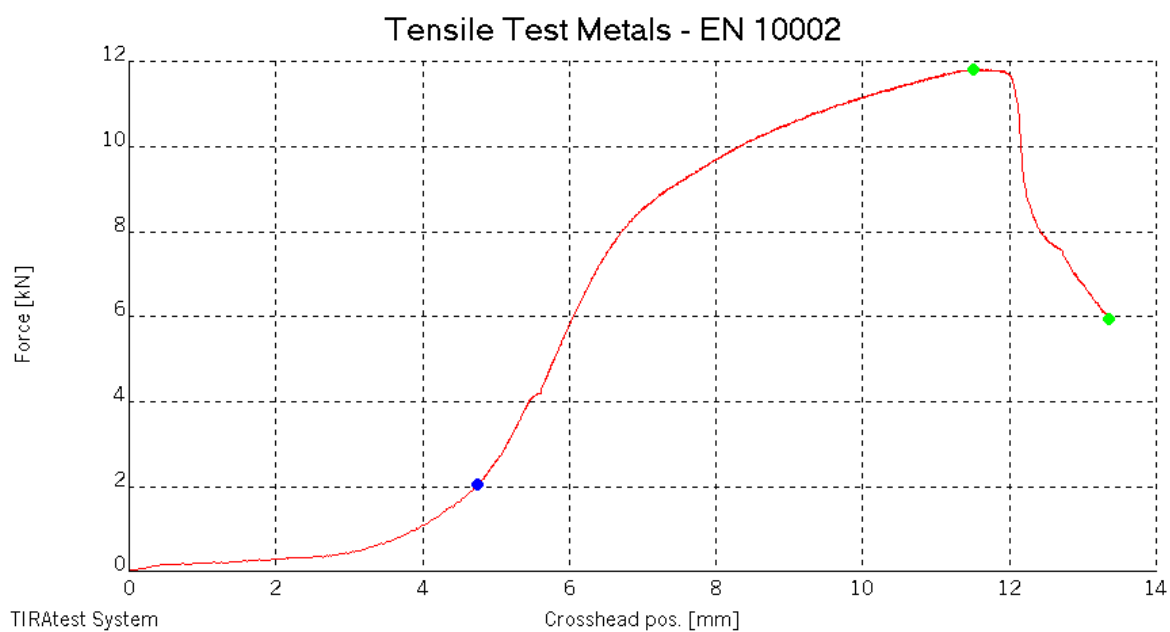
3



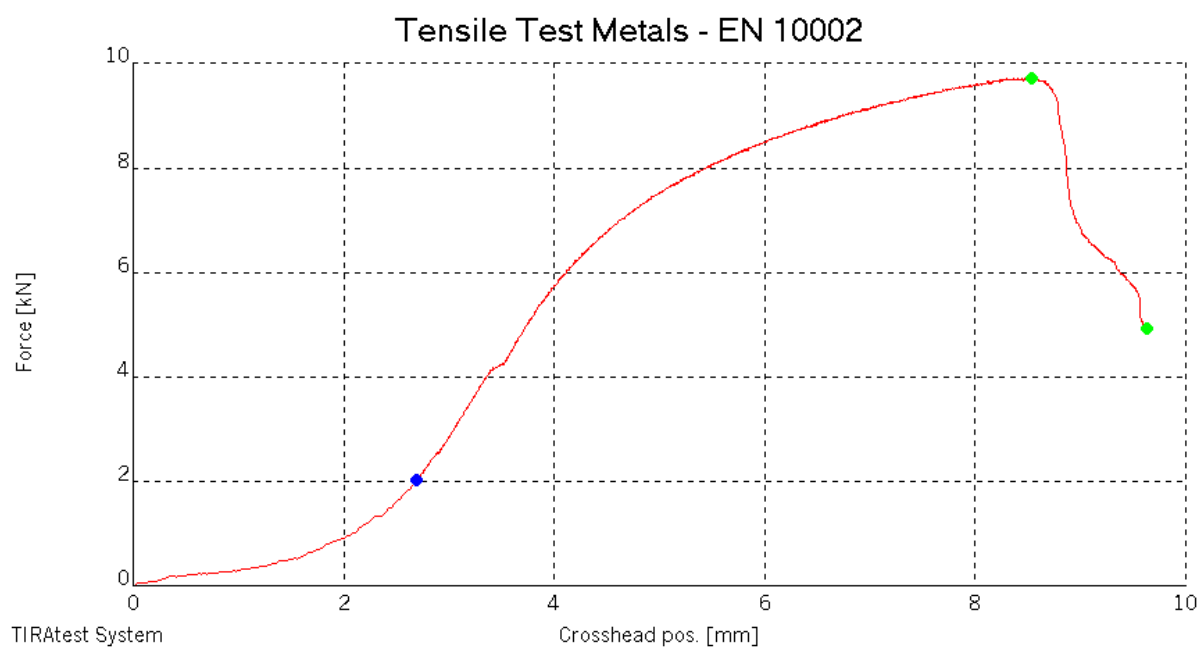
4



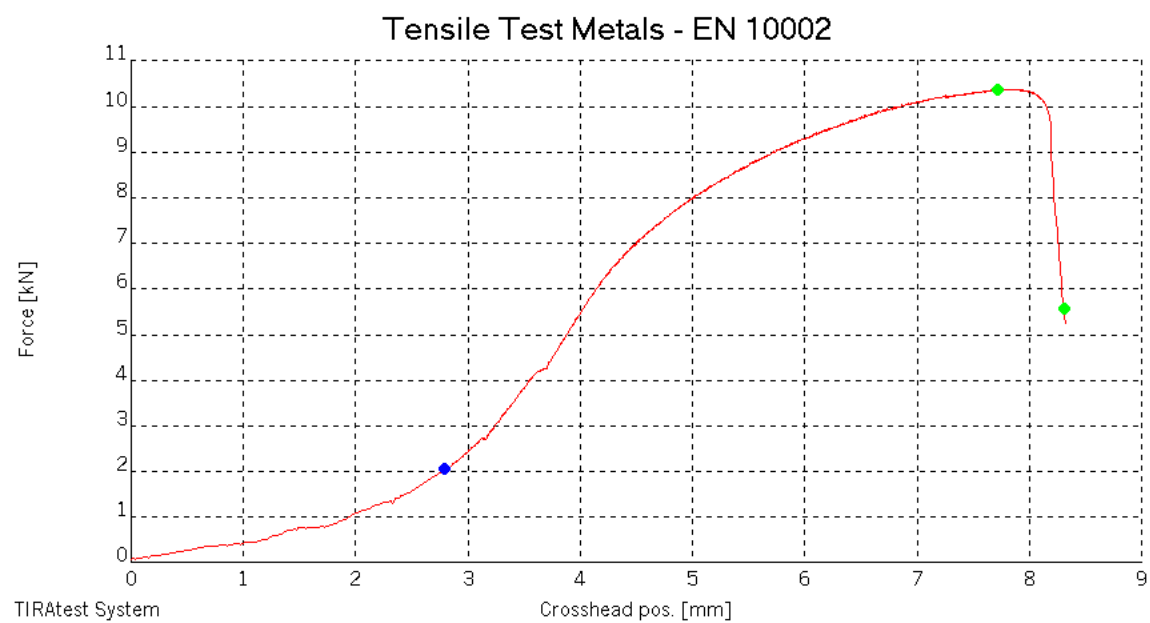
5



6



7



8

